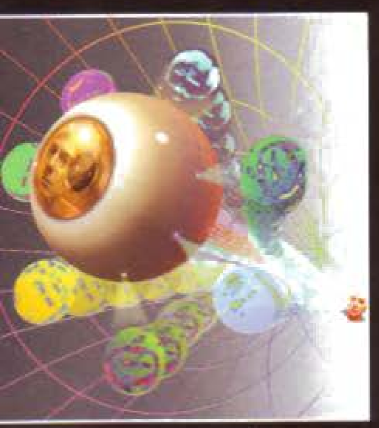
المجلد 23 ـ العددان 8/7
يوليو/أغسطس 2007

SCIENTIFIC AMERICAN
July / August 2007

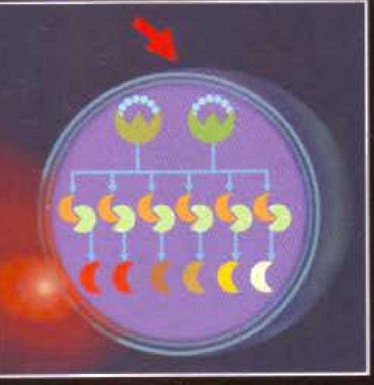
مجلة
العلوم
الترجمة العربية لمجلة ساينتفيك أمريكان
تصدر شهرياً في دولة الكويت عن
مؤسسة الكويت للتقدم العلمي

استخدام الهدروجين كوقود للسيارات

العددان 232/231 . السعر 1.500 دينار كويتي


الأفلام السينمائية في عيوننا


لعبة مأزق المسافر


طرق أفضل لاستهداف الألم

* الحدود المنطقية والرياضياتية
* هل هناك شفاء من الكَلَب ؟
* البحث عن الكود العصبي
* قوة المحولات الريبية
* السيليكون يصدر حزماً ليزرية.

Majallat
AlOloom

المجلد 23 ـ العددان 8/7
يوليو/أغسطس 2007

مجلة العلوم



المقالات

ترجمة أو مراجعة

4



نظرية المباريات

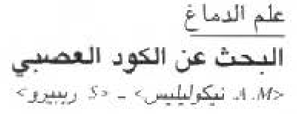
لعبة مأزق المسافر

<K. باسو>

خضر الأحمد ـ عدنان الحموي

غالبًا ما يرفض لاعبو هذه اللعبة البسيطة الخيارَ العقلاني. وفي واقع الأمر، فإن تصرفهم اللامنطقي هذا يجعلهم في نهاية المطاف من الفائزين بجائزة أكبر ـ وهذه نتيجة تتطلب نوعًا جديدًا من المحاكمة الصورية (التفكير الصوري).

10



علم الدماغ

البحث عن الكود العصبي

<M.A. نيكوليليس> ـ <S. ريبيرو>

زياد القطب ـ محمد توفيق الرخاوي

إن معرفة الكيفية التي تُفلت وفقها الجرذان من القطط، تكشف كيف تُترجم إلى معلومات عاصفةٌ من النبضات تكتسح الدماغ.

18

طاقة

استخدام الهدروجين كوقود للسيارات

<S. ساتيابال> ـ <J. بيتروفيتش> ـ <G. توماس>

عبدالحليم منصور ـ نزار الريس

يعمل الباحثون اليوم على إيجاد سبل تُمكّن السيارات التي تعمل بخلايا الوقود، من التزود بالهدروجين الذي تحتاج إليه لقطع مسافات طويلة.

26



طبّ

هل هناك شفاء من الكَلَب؟

<R. E. ويلوكباي جونير>

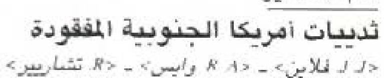
أحمد الكفراوي ـ محمد صادق فرعون

إن بقاء مراهقة على قيد الحياة بعد إصابتها بالكَلَب ربما يشير إلى طريقةٍ لمعالجة هذا المرض المروّع.

34







علم الأحافير

ثدييات أمريكا الجنوبية المفقودة

<J. J. فلاين> ـ <A. R. وايس> ـ <R. تشارييير>

فؤاد العجل ـ عبدالقادر عابد

تجمّع غير متوقّع لأحافير ثديية فريدة يُبطل أفكارا بقيت راسخة مدةً طويلة حول التاريخ الجيولوجي لأمريكا الجنوبية.

42



حدود العلم

الحدود المنطقية والرياضياتية

<J. P. دولاهاي>

أبو بكر سعدالله ـ عدنان الحموي

تحديات عديدة واجهت علماء الرياضيات عبر التاريخ، وقد تطلب بعضها قرونا من الجهد للتغلب عليها. ويرى <J. P. دولاهاي> أن اكتشاف استحالات أساسية وإثباتها يعدّان جزءا من أبرز عناصر التقدم في هذا المضمار.

«مجلة العلوم» تصدر شهريا في الكويت منذ عام 1986 عن «مؤسسة الكويت للتقدم العلمي»، وهي مؤسسة أهلية ذات نفع عام يرأس مجلس إدارتها صاحب السمو أمير دولة الكويت، وقد أنشئت عام 1976 بهدف المعاونة في التطور العلمي والحضاري في دولة الكويت والوطن العربي، وذلك من خلال دعم الأنشطة العلمية والاجتماعية والثقافية. و«مجلة العلوم» هي في ثلاثة أرباع محتوياتها ترجمة لـ«ساينتفيك أمريكان» التي تعتبر من أهم المجلات العلمية في عالم اليوم. وتسعى هذه المجلة منذ نشأتها عام 1845 إلى تمكين القارئ غير المتخصص من متابعة تطورات معارف عصره العلمية والتقانية وتوفير معرفة شمولية للقارئ المتخصص حول موضوع تخصصه. تصدر «ساينتفيك أمريكان» بثماني عشرة لغة عالمية، وتتميز بعرضها الشيق للمواد العلمية المتقدمة وباستخدامها القيم للصور والرسوم الملونة والجداول.

46



بيولوجيا جزيئية

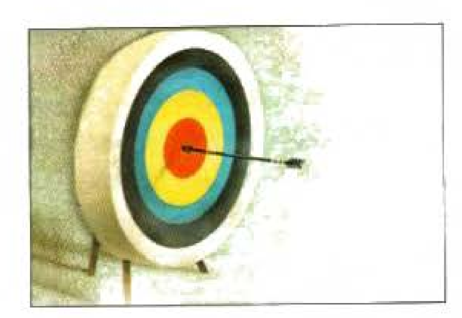
قوة المحولات الريبية

<J. F. باريك> - <R. R. بريكر>

هاني رزق - محمد عبدالحميد شاهين

إن قِطَع الرنا RNA المكتشفة حديثا، والتي تعمل مثل محولات تُفعّل الجينات أو تثبطها، قد تصبح أهدافا لأصناف جديدة من العقاقير.

54



ابتكارات

طرق أفضل لاستهداف الألم

<G. ستيكس>

سامي القباني - عدنان الحموي

إن تعميق فهمنا للطرق الكيميائية التي يعمل بها الدواءان الأسبرين والڤيوكس، قد يؤدي إلى إنتاج أدوية لتسكين الآلام مفعولها أفضل مما هو متوافر حاليا

58



علم الأعصاب

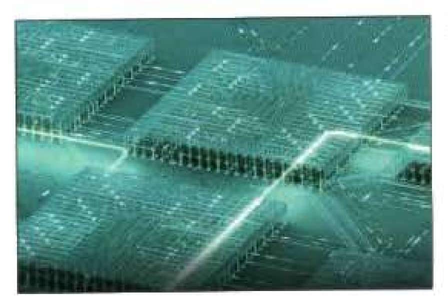
الأفلام السينمائية في عيوننا

<F. ويربلين> - <B. روسكا>

محمد توفيق الرخاوي - زياد القطب

تعالج الشبكية معلومات تفوق كثيرا ما تخيله أي شخص على الإطلاق، مرسلةً دستة أفلام سينمائية مختلفة إلى الدماغ

66



تقانة المعلومات

السيليكون يصدر حزمًا ليزرية

<بهرام جلالي>

رياض صابوني - بسام المعصراني

وأخيرا، تمكن العلماء من حث السيليكون على إصدار حزم ليزرية. وبعد سنوات قليلة سوف تتعامل الحواسيب والأجهزة الأخرى مع الضوء كما تتعامل مع الإلكترونات

74 **عروض ومراجعات كتب**

- كتابان جديدان يقولان إن الوقت قد حان لإسقاط نظرية الأوتار
- هل الجمال حقيقة والحقيقة جمال.

77 **تنميات مستدامة**

بوسع الخطوات الراسخة المتخذة حاليا أن تضع سريعا أشد الناس فقرا على درب الاعتماد على الذات.

78 **معرفة عملية**

حشيش ذو تقانة رفيعة Hi-tech

80 **اسألوا أهل الخبرة**

- كيف يقتفي الباحثون عبر القرون أثر دنا DNA الميتوكندرات؟
- كيف تتشكل القواقع البحرية، أو كيف تتشكل قوقعة الحلزون؟

81 **أخبار علمية**

ضربة قاضية في درجات الحرارة العالية

لعبة مأزق المسافر[*]

بشدة، يرفض لاعبو هذه اللعبة البسيطة الخيارَ العقلاني. وفي واقع الأمر، فإن تصرفهم اللامنطقي هذا يجعلهم في نهاية المطاف من الفائزين بجائزة أكبر - وهذه نتيجة تتطلب نوعا جديدا من المحاكمة الصورية[1].

<K باسو>

بعد عودة «لوسي» و«باسل» من جزيرة نائية في المحيط الهادي، وجدا أن شركة الخطوط الجوية، التي سافرا على إحدى طائراتها، أتلفت القطع الأثرية المتطابقة التي اشتراها كل منهما. وقال أحد مديري تلك الشركة إنه سعيد بدفع تعويض لهذين الراكبين، لكنه عاجز عن تقدير قيمة هذه الأشياء الغريبة. وهو يرى أن مجرد سؤال المسافرَيْن عن السعر لا يُجدي نفعا، لأنهما سيبالغان في تقدير قيمة تلك القطع.

لذا فقد وضع ذلك المدير خطة أكثر تعقيدا، وذلك بأن يطلب إلى كل منهما كتابة سعر القطع، بحيث يكون الثمن عددا صحيحا من الدولارات يقع بين 2 و100، من دون أن يتشاورا حول ذلك. فإذا سجّلا العدد نفسه، قبله المدير باعتباره السعر الحقيقي، ومن ثم يدفع لكل منهما المبلغ المقابل. أما إذا سجلا عددين مختلفين، فسيفترض المدير أن العدد الأقل هو السعر الحقيقي، وأن الشخص الذي سجل العدد الأكبر قام بعملية غش. وفي هذه الحالة، يدفع لكل منهما العدد الأقل؛ إضافة إلى مكافأة وغرامة - فالشخص الذي كتب العدد الصغير، يكافأ بزيادة دولارين على المبلغ الذي قدمه لأمانته. أما ذاك الذي سجل العدد الكبير، فيغرم بخصم دولارين من المبلغ الصغير. وعلى سبيل المثال، إذا كتبت لوسي 46، وكتب باسل 100، حصلت لوسي على 48 دولارا وباسل على 44 دولارا.

تُرى، ما هما العددان اللذان سيكتبهما باسل و لوسي؟ وما هو العدد الذي تكتبه أنت؟

هذا النوع من السيناريوهات، التي يتاح فيها لفرد أو أكثر، خيارات يعتمدها، والتي تقدم فيها مكافآت وفقا لتلك الخيارات، يُسمى من قبل الناس الذين يدرسونه (وهم **الباحثون في نظرية المباريات**[2]) **العابا**[3]. وقد صممتُ هذه اللعبة «**مأزق المسافر**»[4] (TD) عام 1994 وفي ذهني عدة أهداف أهمها: تفنيد النظرة الضيقة **للسلوك العقلاني**[5] **والعمليات الإدراكية**[6] التي ينتهجها الاقتصاديون وكثير من المتخصصين في العلوم السياسية، وتحدي الفرضيات المؤيدة **لمذهب الحرية الاقتصادية**[7] التي ينطلق منها علم الاقتصاد التقليدي، وتسليط الضوء على **مُحيِّرة**[8] منطقية **للعقلانية**[9].

وتحقق لعبة «مأزق المسافر» هذه الأهداف، لأن منطق هذه اللعبة يقتضي أن يكون العدد 2 الخيار الأفضل، مع أن معظم الناس ينتقون العدد 100، أو عددا قريبا من 100 - وهاتان فئتان من الناس، عناصر أولاهما لم يفكروا منطقيا، وعناصر الفئة الأخرى يدركون تماما أنهم منحرفون كثيرا عن الاختيار «العقلاني». إلى ذلك، يجني اللاعبون مكافأة أعلى بعدم تمسكهم بالمنطق بهذه الطريقة. لذا، ثمة شيء عقلاني في اختيار اللاعقلانية في لعبة مأزق المسافر.

وفي السنوات التي انقضت منذ تصميمي للعبة مأزق المسافر، حظيت هذه اللعبة باهتمام بالغ، إذ قام الباحثون بتوسيعها، وإعلان اكتشافاتهم التي حصلوا عليها بعد التجارب المختبرية. وقد ولّدت هذه الدراسات تبصرات في اتخاذ الناس لقراراتهم. ومع ذلك، فمازال ثمة أسئلة مفتوحة عن الطريقة التي يُطبق بها المنطق والمحاكمة العقلية على لعبة مأزق المسافر.

نظرة إجمالية/ اللاعقلانية المدركة بالإحساس[**]

- **في لعبة مازق المسافر، يختار شخصان، كل على حدة، عددا صحيحا من 2 إلى 100، ويكافأ الشخص الذي عدده أصغر بمبلغ أكبر من المال. وتؤكد نظرية المباريات أن العقلانية يجب أن تقود اللاعبين إلى اختيار العدد 2، لكن معظم الناس ينتقون عددا صحيحا قريبا من 100.**
- **والتوصل إلى فهم دقيق للاختيار العقلاني ألا نكون عقلانيين، يحتاج إلى نوع جديد من المحاكمة العقلية.**
- **إن نتائج (لعبة) مازق المسافر تناقض افتراض الاقتصاديين بأن نظرية المباريات قادرة على التنبؤ بالطريقة التي يُفترض أن يتصرف بها الناس العقلانيون الأنانيون. وتبين هذه النتائج أيضا، أن الأنانية لا تعود دائما على الذين يتصفون بها بفوائد اقتصادية جيدة.**

الحصافة[10] والعالِم ناش[11][***]

لمعرفة السبب في أن 2 هو الخيار المنطقي، لننظر في خط التفكير، المقبول ظاهرا، الذي قد تسلكه لوسي: فكرتها الأولى هي

(*) THE TRAVELER'S DILEMMA
(**) Overview/ Sensible Irrationality
(***) Common Sense and Nash
(1) formal reasoning أو التفكير الصوري
(2) game theorists
(3) games
(4) Traveller's Dilemma
(5) rational behavior
(6) cognitive processes
(7) libertarian presumptions
(8) paradox
(9) rationality
(10) common sense الحسّ العام أو الفطرة السليمة
(11) John F. Nash (13/6/1928) أحد العلماء الأمريكيين في الرياضيات وتحديدا في نظرية المباريات، الهندسة التفاضلية والمعادلات التفاضلية الجزئية. حاز عام 1994 على جائزة نوبل في الاقتصاد مشاركة مع باحثين آخرين في نظرية المباريات. وقد اشتهر شعبيا بعبقريته في الرياضيات وصراعه مع **الفصام** schizophrenia (التحرير)



أنها يجب أن تكتب أكبر عدد ممكن، وهو 100، الذي يجعلها تحصل على 100 دولار إذا كان باسل طماعا مثلها (إذا كان ثمن القطع الأثرية حقا أقل كثيرا من 100 دولار، فإنها ستفكر الآن بسرور في غباء خطة مدير شركة الخطوط الجوية.)

بيد أن ما طرأ على بالها سريعا أنها لو كتبت 99 بدلا من 100، فستجني مبلغا أكبر قليلا من الدولارات، لأنها ستحصل، في تلك الحالة، على 101 دولار. لكن هذه الفكرة ستخطر، قطعا، ببال باسل. فلو كتب كلاهما 99 لحصلت لوسي على 99 دولارا. ولو كتب باسل 99، لكان من الأفضل لها كتابة 98، لأنها ستحصل، في هذه الحالة، على 100 دولار. غير أن هذا المنطق نفسه سيقود باسل إلى اختيار العدد 98 أيضا. وفي تلك الحالة، يمكنها كتابة 97 والحصول على 99 دولارا. وهكذا. إن الاستمرار في هذا الخط من المحاكمة العقلية، سيجعل المسافرَيْن ينزلان إلى أصغر عدد مسموح به، وهو 2. وقد يبدو أن من المعقول جدا أن تسلك لوسي، فعلا، كل الطريق الذي يؤدي إلى 2 لدى اتباعها هذا الأسلوب. وهذا ما يقودنا إليه المنطق.

وعموما، يستعمل المتخصصون في نظرية المباريات هذا النمط من التحليل، الذي يُسمى **استقراء تراجعيا**[1]. ويتنبأ الاستقراء التراجعي بأن كل لاعب سيكتب 2، وأن المطاف سينتهي بكل منهما إلى الحصول على دولارين (وهذه نتيجة قد تفسر السبب في نجاح مدير شركة الطيران في عمله بالشركة). وعمليا، تتنبأ جميع **النماذج**[2]، التي يستعملها العلماء في نظرية المباريات بالوصول إلى هذه النتيجة في لعبة «مأزق المسافر» - وهي أن اللاعبيْن يحصلان على مبلغ أقل بمقدار 98 دولارا مما يحصلان عليه لو اختار كل منهما ببساطة 100 دولار من دون أن يفكرا مليا بالفوائد التي يجنيانها من انتقائهما عددا أصغر.

وترتبط لعبة مأزق المسافر بلعبة **مأزق السجين**[3] الأكثر انتشارا بين الناس، التي استُجوب فيها مشبوهان بارتكاب جريمة خطيرة، كل على انفراد، وكان يحق لكل منهما تجريم الآخر (مقابل تساهل السلطات معه) أو البقاء صامتا (وهذا لا يوفر للشرطة أدلة ملائمة للبت في القضية، وذلك إذا بقي السجين الآخر صامتا أيضا). وتبدو هذه الحكاية مختلفة جدا عن قصة المسافريْن اللذيْن تضررت قطعهما الأثرية، لكن رياضيات المكافآت لكل خيار في «مأزق السجين» مطابقة لرياضيات المكافآت في «مأزق المسافر» التي يسمح فيها لكل لاعب أن يختار 2 أو 3 فقط، بدلا من أي عدد صحيح من 2 إلى 100.

وفي نظرية المباريات، يحلل العلماء الألعاب بعيدا عن زخارف القصص النابضة بالحياة، وذلك بدراسة ما يسمى **مصفوفة المكاسب**[4] لكل لاعب - وهي شبكة مربعة تحوي جميع المعلومات ذات الصلة عن **الخيارات والمكاسب**[5] المحتملة لكل لاعب [انظر *المؤطر في الصفحة 7*]. ويقابل اختيار لوسي سطرٌ، واختيار باسل عمودٌ؛ ويحدد العددان في المربع المختار مكافآتيهما.

وعلى الرغم من الاختلاف في الأسماء، فإن «مأزق السجين»، وما ذكرناه عن اختيار 2 في «مأزق المسافر»، يقدمان لاعبين لا يواجهان مأزقا حقيقيا. ويرى كل مشارك خيارا صحيحا لا لبس فيه، وهو 2 (أو، تجريم الشخص الآخر، عند عرض قصة السجين) يسمى هذا الخيار **الخيار المسيطر**[6]، لأنه أفضل ما يمكن عمله، بصرف النظر عما يفعله اللاعب الآخر. وباختيار لوسي 2 بدلا من 3، فإنها تحصل على 4 دولارات بدلا من 3 دولارات إذا اختار باسل 3، وتحصل على دولارين اثنين بدلا من لا شيء إذا اختار باسل 2.

وبالمقابل، لا يوجد للرواية الكاملة لمأزق المسافر خيار مسيطر. فإذا اختار باسل 2 أو 3، فأفضل ما تفعله لوسي هو اختيار 2. لكن إذا اختار باسل أي عدد من 4 إلى 100، فالأفضل للوسي هو اختيارها عددا أكبر من 2.

وعند دراسة مصفوفة المكاسب، فإن علماء نظرية المباريات يعتمدون غالبا على **توازن ناش**[7]، نسبة إلى <جـ F ناش، جونير>



(1) backward induction
(2) models
(3) Prisoner's Dilemma
(4) payoff matrix
(5) choices and payoffs
(6) the dominant choice
(7) Nash equilibrium

تتنبأ نظرية المباريات بأن «توازن ناش» يحدث عندما تؤدى لعبةُ مأزق المسافر بأسلوب عقلاني.

جون F. ناش

[من جامعة برنستون] (قدّم <R. كرو> العالم <ناش> في الفيلم السينمائي *A Beautiful Mind*) وتوازن ناش نتيجة يستخلص منها أنه ما من لاعب يمكنه تحسين أدائه عندما ينحرف انحرافا أحادي الجانب. لننظر في النتيجة (100، 100) في مأزق المسافر (العدد الأيسر هو اختيار لوسي، والأيمن اختيار باسل). فإن غيرت لوسي اختيارها إلى 99، فستكون النتيجة (99، 100)، وعندئذ تحصل على 101 دولار. ولكون لوسي أفضل حالا بهذا التغيير، فإن النتيجة (100، 100) لا تمثل توازن ناش.

يوجد لمأزق المسافر توازن واحد فقط لناش ـ وهي النتيجة (2، 2)، التي اختار وفقا لها كل من لوسي وباسل العدد 2. إن الاستعمال الكثير لتوازن ناش هو السبب الرئيسي في تنبؤ كثير من التحليلات بهذه النتيجة في مأزق المسافر.

ولدى المتخصصين في نظرية المباريات مفاهيمُ توازن أخرى هي **التوازن الشديد**[1] **والحل القابل للعقلنة**[2] **والتوازن التام**[3] **والتوازن القوي**[4]، وغير ذلك. ويؤدي كل من هذه المفاهيم إلى التنبؤ بـ(2، 2) في حال مأزق المسافر. وهنا تكمن المشكلة: فمعظمنا يجد نفسه مدفوعا بإحساس يوجهه إلى اللعب بعدد أكبر كثيرا، وأنه سيحصل، في المتوسط، على مبلغ أكبر كثيرا من دولارين. ويبدو أن حدسنا مخالف لنظرية المباريات كلها.

اقتضاءات في علم الاقتصاد[*]

إن اللعبة وتنبّؤها الحدسي لنتيجتها يناقضان أيضا أفكار الاقتصاديين. لقد كان علماء الاقتصاد في وقت مبكر مشدودين بقوة إلى الفرضيات المؤيدة لمذهب الحرية الاقتصادية، التي تقضي بترك الأفراد مسيّرين بإراداتهم ورغباتهم الخاصة، لأن خياراتهم الأنانية ستجعل الاقتصاد يعمل بفاعلية. لكن بروز طرائق نظرية المباريات أدى دورا كبيرا في تحرير علم الاقتصاد من هذه الفرضيات. غير أن هذه الطرائق ظلت طويلا مستندة إلى **مسلّمة**[5] مفادها أن الناس يُقْدِمون على خيارات عقلانية أنانية يمكن لنظرية المباريات التنبؤ بها. بيد أن مأزق المسافر يقوض كلا من فكرة مذهب الحرية الاقتصادية، التي تقول إن الأنانية غير المقيدة مفيدة للاقتصاد، وعقيدة نظرية المباريات بأن الناس سيكونون أنانيين وعقلانيين.

تقضي النتيجة «الفعالة» في مأزق المسافر بأن يختار كلا المسافرَيْن 100؛ لأن ذلك يؤدي إلى حصول كلا اللاعبَيْن على الحد الأعلى لمجموع ما يكسبانه. أما أنانية الحرية الاقتصادية فستجعل الناس يبتعدون عن 100 إلى أعداد أصغر بفاعلية أقل، أملا منهم في الحصول على مبلغ أكبر، كل على حدة.

وإذا لم يقم الناس باستعمال استراتيجية توازن ناش (2)، فإن افتراضات الاقتصاديين، المتعلقة بالسلوك العقلاني يجب مراجعتها. وبالطبع، فمأزق المسافر ليس اللعبة الوحيدة التي تتحدى الاعتقاد بأن الناس يقومون دائما باختيارات عقلانية أنانية. لكن ما يثير الناحية الأكثر إدهاشا، هو أنه حتى لو لم يكن كل من اللاعبَيْن معنيا إلا بالفائدة العائدة إليه شخصيا، فليس من المعقول بالنسبة إليهما اللعب بالطريقة التي يتنبأ بها التحليل الصُوري.

ولمأزق المسافر نتائج أخرى في فهمنا لأوضاع عالمنا الحقيقي. فاللعبة تسلط الضوء على الطريقة التي يجري وفقها سباق التسلح، بوصفه عملية تدريجية تسير بنا بخطوات صغيرة لتوصلنا إلى نتائج تتزايد سوءًا. وقد حاول علماء نظرية المباريات أيضا، توسيع مأزق المسافر لفهم الطريقة التي تسلكها شركتان متنافستان، تجبر كل منهما الشركة الأخرى على تخفيض أسعارها، مما يؤدي إلى إلحاق الضرر بهما (مع أن ذلك يصب، في هذه الحالة، في مصلحة المستهلكين الذين يشترون بضائع من تلك الشركتين).

وقد أدت جميع هذه الاعتبارات إلى طرح سؤالين: كيف يلعب الناس فعليا هذه اللعبة؟ وإذا اختار معظم الناس عددا أكبر كثيرا من 2، فهل بمقدورنا تفسير سبب فشل نظرية المباريات في التنبؤ بذلك؟ فيما يتعلق بالسؤال الأول، فنحن نعرف الآن الكثير عنه. أما السؤال الآخر، فلا نعرف عنه سوى القليل.

كيف يتصرف الناس في الواقع[**]

خلال العقد الماضي، أجرى الباحثون كثيرا من التجارب على مأزق المسافر، وتوصلوا إلى كثير من المعلومات الجوهرية عن هذه اللعبة. وثمة تجربة مختبرية شهيرة، استُعملتْ فيها قطع نقود حقيقية من قبل طلبة كلية الاقتصاد، بوصفهم لاعبين. نفذ التجربة في جامعة فرجينيا كل من <M .C. كابرا> و<K .J. گوييري> و<R. گوميز> و<A .C. هولت>. دُفع للطلبة 6 دولارات للمشاركة، واحتفظوا بأي نقود إضافية كسبوها في اللعبة. ولتسهيل التعامل، كانت الخيارات تقدر بالسنتات بدلا من الدولارات، وكان مجال الخيارات محددا بين 80 و 200، وكانت قيمة الغرامة والمكافأة تتغير في المراحل المختلفة للعبة، من مبلغ صغير قدره 5 سنتات، إلى آخر كبير قدره 80 سنتا. وقد أراد المجربون معرفة ما إذا كان لتغيير حجم الغرامة والمكافأة أهمية في طريقة أداء اللعبة. إن تغيير حجم المكافأة والغرامة لا يغير أيا من التحليلات الصورية: فالاستقراء التراجعي يؤدي دائما إلى النتيجة (80، 80)، وهي توازن ناش في كل حالة.

لقد أثبتت التجربة التوقع الحدسي بأن اللاعب المتوسط لا يطبق استراتيجية توازن ناش 80. وعندما كانت قيمة المكافأة 5 سنتات، كان متوسط اختيار اللاعبين هو 180؛ وهذا الاختيار تدنى إلى 120 عندما ارتفعت المكافأة إلى 80 سنتا.

(*) Implications for Economics
(1) strict equilibrium
(2) rationalizable solution
(3) perfect equilibrium
(4) strong equilibrium
(5) axiom
(**) How People Actually Behave

مصفوفة المكاسب في «مأزق المسافر»[*]

توفر **مصفوفة المكاسب**[1] هذه لعلماء نظرية المباريات جميع ما يحتاجون إلى معرفته عن لعبة مأزق المسافر. فاختيارات <لوسي> المحتملة مبينة في العمود الموجود في أقصى *اليسار*، أما اختيارات <باسل> فهي في السطر العلوي. وأول عدد في المربع الذي يتقاطع فيه السطر والعمود المختاران هو مكسب لوسي، والعدد الثاني هو مكسب باسل. فمثلا، إذا اختارت لوسي 98 وباسل 99، فإن لوسي تستلم 100 دولار، وباسل يستلم 96 دولارا.

ونتيجة اختيار كلا اللاعبين 2 وحصول كل منهما على دولارين (*اللون الذهبي*)، تُسمى **توازن ناش** Nash equilibrium. ويكون أداء لوسي أسوأ [لأنها تكسب 0 دولار] إذا اختارت أي عدد آخر وواصل باسل اختياره للعدد 2. وبالمثل، فإن أداء باسل يكون أسوأ إذا اختار وحده عددا ما غير العدد 2.

وعندما تُقصر الخيارات على 2 و 3 فقط [*المستطيل الأسود اللون*]، تصبح اللعبة مكافئة للعبة مأزق السجين.

اختيار باسل [بالدولارات]

اختيار لوسي [بالدولارات]	2	3	4	...	98	99	100
2	2 2	4 0	4 0	...	4 0	4 0	4 0
3	0 4	3 3	5 1	...	5 1	5 1	5 1
4	0 4	1 5	4 4	...	6 2	6 2	6 2
...	...	...	...		...	...	...
98	0 4	1 5	2 6	...	98 98	100 96	100 96
99	0 4	1 5	2 6	...	96 100	99 99	101 97
100	0 4	1 5	2 6	...	96 100	97 101	100 100

درستْ <كابرا> وزملاؤها، أيضا، كيف يمكن أن يتغير سلوك اللاعبين نتيجة ممارسة لعبة مأزق المسافر مرارا وتكرارا. فهل يتعلمون اختيار توازن ناش، حتى لو لم يكن هذا حدسهم الأول؟ وفعلا، عندما كانت المكافأة كبيرة، كان اللعب بمرور الوقت، يتقارب نزولا من توازن ناش 80. بيد أن ما يثير الاستغراب هو أنه عندما كانت المكافآت ضئيلة، كان الاختيار يتزايد باتجاه الحد الأقصى المقابل، وهو 200.

تلقت حقيقة كون الناس لا يختارون، في الغالب، توازن ناش، مزيدا من الدعم من تجربة جرت عن طريق الإنترنت، لم تقدم فيها دفعات مالية حقيقية، نفذها <A. روبنشتاين> [من جامعة تل أبيب وجامعة نيويورك] منذ عام 2002 إلى عام 2004. وقد تطلبت اللعبة من اللاعبين، الذين كانوا سيحضرون إحدى محاضرات روبنشتاين عن «نظرية المباريات وناش»، اختيار عدد صحيح بين 180 و 300، كان عليهم اعتباره مقدرا بالدولارات. وكان مقدار المكافأة/ الغرامة محددا بخمسة دولارات.

وقد استجاب نحو 2500 شخص من سبع دول، مما هيأ للتجربة حجمَ عينة كبيرا وتنوعا واسعا لا يمكن توفيره في المختبر. وقد اختار أقل من سُبُع عدد اللاعبين توازن ناش 180. واختار معظمهم (55 في المئة) العدد الأكبر 300 [*انظر المؤطر في الصفحة 8*]. وما أثار الدهشة هو أن البيانات كانت متشابهة جدا في الزمر الجزئية المختلفة، مثل الناس المنتمين إلى دول مختلفة.

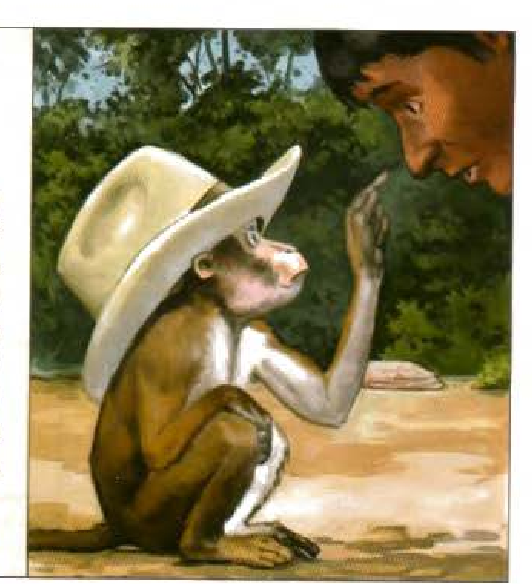
لكن عمليات التفكير التي تولد هذا النمط من الاختيارات تظل غامضة. وبوجه خاص، كان أكثر الاستجابات شيوعا (300) هو الاستراتيجية الوحيدة التي «سيطرت» في اللعبة - وهذا يعني استراتيجية أخرى (299) لا يمكن أن تفعل أسوأ من ذلك، وتكون أحيانا أفضل.

قسّم <روبنشتاين> الاختيارات الممكنة إلى أربع مجموعات محتملة من الأعداد، ووضع فرضية تقضي بأن ثمة عملية إدراكية مختلفة تكمن وراء كل منها. فالعدد 300 هو استجابة عاطفية عفوية واختيار عدد يقع بين 295 و 299 يتضمن محاكمة عقلية استراتيجية (مثلا، قدرا معينا من الاستقراء التراجعي). وأي عدد من 181 إلى 294 يصلح، إلى حد ما، ليكون اختيارا عشوائيا. وأخيرا، فنظرية المباريات تفسر سبب اختيار 180، لكن اللاعبين ربما توصلوا إلى ذلك العدد بأنفسهم، أو ربما كان لديهم معرفة سابقة باللعبة.

وثمة اختبار **لِمُخَمّنة روبنشتاين**[2]، المتعلقة بالمجموعات الثلاث الأولى، لرؤية المدة التي استغرقها كل لاعب لاتخاذ قرار. وفي الحقيقة، فأولئك الذين اختاروا من 295 إلى 299، استغرقوا وسطيا أطول وقت (96 ثانية)، في حين أن من اختار من 181 إلى 294 أو 300 استغرق قرابة 70 ثانية - وهذا ينسجم مع فرضية روبنشتاين القائلة إن الناس الذين اختاروا من 295 إلى 299 فكروا أكثر من أولئك الذين اعتمدوا خيارات أخرى.

لقد أجرى المتخصصون في نظرية المباريات عددا من المحاولات لتفسير عدم اختيار عدد كبير من اللاعبين توازن ناش في لعبة مأزق المسافر. وقد حاجّ بعض المحللين في أنه ثمة كثير من الناس غير قادرين على القيام بالمحاكمة الاستنتاجية الضرورية، ومن ثم فهم يعتمدون اختيارات غير عقلانية عن غير علم. ولا بد أن يكون هذا التفسير صحيحا في بعض الحالات، لكنه لا يفسر جميع النتائج، كتلك التي حصل عليها عام 2002 <T. بيكر> و <M. كارتر> و <J. نايبف>، الذين كانوا جميعا حينذاك في جامعة هوهنهايم بألمانيا. وفي التجربة التي أجروها، لعب 51

(*) Payoff Matrix of the Traveler's Dilemma
(1) payoff matrix
(2) Rubenstein's conjecture



نظرية المباريات مقابل نظرية اتخاذ القرار العادية : أنا أعرف أنك تعرف أنني أعرف ...(*)

سمعتُ هذه الحكاية في الهند. فعندما كان بائع قبعات يصحو من قيلولته تحت إحدى الأشجار، وجد أن مجموعة من القرود نقلت جميع قبعاته إلى أعلى الشجرة. عند ذلك انتابته نوبة غضب، وألقى بقبعته التي كان يعتمرها على الأرض. وما إن رأت القرود ـ المعروف عنها حبها للتقليد ـ ما فعل الرجل، حتى رمت جميع القبعات على الأرض، وإذ ذاك، سارع البائع بجمعها.

بعد نصف قرن من هذا الحادث، وضع حفيد البائع ـ الذي هو أيضا، بائع قبعات ـ بضاعته تحت الشجرة نفسها لينعم بقسط من القيلولة. وعندما استيقظ، أصيب بالفزع حين اكتشف أن القرو[د] أخذت جميع قبعاته إلى أعلى الشجرة. وإذ ذا[ك] تذكر حكاية جده، ومن ثم قذف بقبعته التي كان[ت] على رأسه إلى الأرض. لكن، وبسبب خفي، لم ير[مِ] أي من القرود أي قبعة، وقام واحد فقط من القرو[د] بالنزول إلى الأرض، ثم أمسك بالقبعة بقوة، واتج[ه] نحو بائع القبعات، ووجه إليه صفعة عنيفة وقال[:] «هل تظن أنك الوحيد الذي له جد؟»

توضح هذه الحكاية اختلافا مهما بين نظرية اتخا[ذ] القرار العادية ونظرية المباريات. ففي النظر[ية] الأخيرة، ما هو عقلاني للاعب قد يعتمد على ما ...

عضوا من جمعية نظرية المباريات ـ وجميعهم عمليا متخصصون محترفون في هذه النظرية ـ اللعبة الأصلية في مأزق المسافر، من 2 إلى 100. وقد لعب كل منهم مع نظرائه الخمسين الآخرين، وذلك باختيارهم استراتيجية وإرسالها إلى الباحثين. قد تكون الاستراتيجية عددا وحيدا يُستعمل في كل لعبة، أو استعمال تشكيلة من الأعداد، واعتماد عدد مرات استعمال كل منها. وقد تضمنت اللعبة نظام مكافآت نقدية. يختار المجربون لاعبا بطريقة عشوائية ليربح 20 دولارا مضروبا بالعدد المقابل لمتوسط ربح هذا اللاعب في اللعبة. وهكذا فإن الفائز، الذي كان متوسط ربحه 85 دولارا، حصل على 1700 دولار.

ومن بين اللاعبين الذين عددهم 51، اختار 45 منهم عددا وحيدا لاستعماله في كل لعبة (أما الستة الآخرون، فاختاروا أكثر من عدد واحد). ومن بين هؤلاء الذين عددهم 45، لم يختر توازن ناش (2) إلا ثلاثة منهم، واختار عشرة منهم الاستراتيجية (100)، كما اختار 23 منهم أعدادا من 95 إلى 99. ومن المفترض أن يعرف المتخصصون في نظرية المباريات كيف يفكرون استنتاجيا. لكنهم، عموما، لم يعتمدوا الاختيار العقلاني الذي تمليه نظرية المباريات المنهجية.

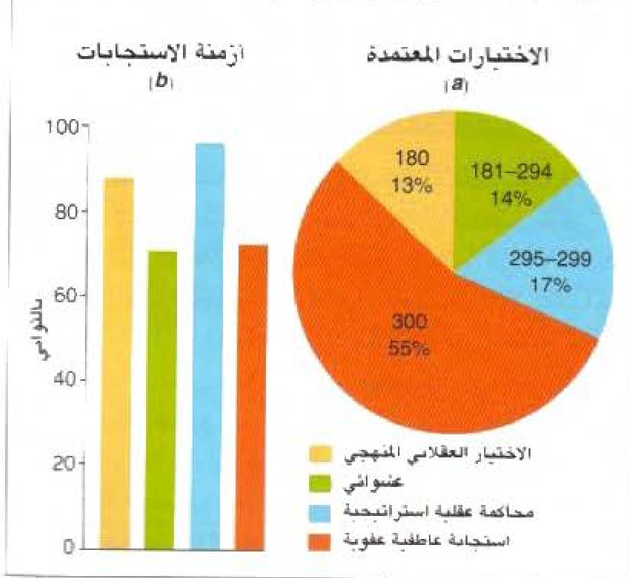
ولو نظرنا إلى الأمر بطريقة سطحية، لبدا لنا أن تفسير اختياراتهم بسيط، وهو أن معظم المشاركين توصلوا إلى حكم حصيف بأن نظراءهم سيختارون أعدادا من شريحة التسعينات العالية. لذا فاختيار عدد كبير، بوجه مشابه، يؤهلهم لكسب أعلى عائد متوسط. لكن، لماذا توقع كل شخص أن يختار كل شخص آخر عددا كبيرا؟

ربما كانت **الغيرية**(1) مغروسة بقوة في نفوسنا جنبا إلى جنب مع الأنانية. لذا فسلوكنا حصيلة صراع بينهما. نحن نعرف أن مدير شركة الخطوط الجوية سيدفع أكبر قدر من المال إذا اختار كلاهما 100. وكثير منا لا يرضى أن «يخذل» رفيقه في السفر ليربح مجرد دولار إضافي، لذا فنحن نختار 100، حتى لو كنا ندرك تماما، عن سابق تفكير، أن 99 خيار أفضل لنا كأفراد.

ولقطع شوط أبعد في تفسير المزيد من أنماط السلوك التي تُرى في مثل هذه التجارب، قدم بعض الاقتصاديين افتراضات قوية، لكنها لا تحظى بقدر عالٍ من الواقعية، ثم استخلصوا السلوك المرصود من نماذج معقدة. وإني لا أعتقد أننا سنتعلم الكثير من هذا الأسلوب. ومع تحول هذه النماذج والافتراضات لتصبح أعقد من أن تكون ملائمة للبيانات، فإنها توفر لنا بصيرة تضعف قوتها مع الزمن.

ما الذي كانوا يفكرون فيه ؟(**)

افترض الباحثون أن عمليات التفكير المختلفة تكمن وراء الأنماط المختلفة من الخيارات التي اعتمدها الناس في لعبة مأزق المسافر، التي تمتد فيها الخيارات من 180 إلى 300 [الرسم البياني (a)]. فعندما تكون استجاباتهم عاطفية وعفوية، يختارون 300؛ أما إذا كان الاختيار نتيجة تفكير استراتيجي، فهم يختارون [295-299]؛ وأما إذا كان عشوائيا، فيختارون [181-294]. إن اللاعبين الذين يعتمدون خيارا عقلانيا صوريا [180]، ربما يكونون قد استنتجوه أو عرفوه مسبقًا. وكما هو متوقع، فالناس الذين يعتمدون خيارات «عفوية» أو «عشوائية» يستغرقون في عملية اختيارهم الفترات الزمنية الأقصر [الرسم البياني (b)]



(*) Game Theory vs. Ordinary Decision Theory: I Know that You Know that I Know ...

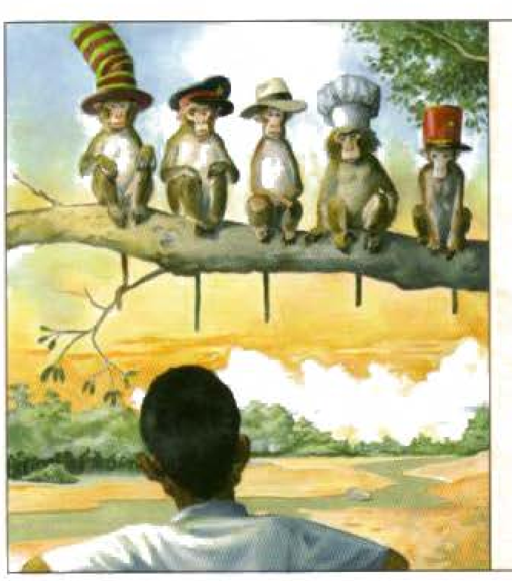
(**) What Were They Thinking?

(1) altruism

عقلاني للاعب الآخر. فكي تتخذ لوسي قرارها السليم، يجب عليها أن تضع نفسها في موضع باسل، وتفكر فيما يجب أن يفكر فيه. لكنه سيفكر فيما تفكر لوسي فيه، وهذا يؤدي إلى عملية تراجع لانهائية. ويصف علماء نظرية المباريات هذا الوضع بقولهم: «العقلانية هي معرفة مشتركة بين اللاعبين.» وبعبارة أخرى، فإن لوسي و باسل عقلانيان، وكل منهما يعرف أن الآخر عقلاني، وكل منهما يعرف أن الآخر يعرف، وهلم جرا.

الافتراض بأن العقلانية معرفة مشتركة أمر شائع في نظرية المباريات، ونادرا ما يُعلن ذلك صراحة. لكنه قد يقحمنا في مشكلات في بعض الألعاب، مثل لعبة مأزق السجين، التي يمكن للأعبين فيها أن يقوموا بحركات متعارضة مع هذا الافتراض.

وإني أعتقد أن الافتراض بأن العقلانية معرفة مشتركة هي مصدر التعارض بين المنطق والحدس وبأن الحدس، في حالة لعبة مأزق المسافر، سليم، وهو بانتظار إثبات صحته من خلال منطق أفضل. والمشكلة شبيهة بما حدث في وقت مبكر من نشوء نظرية المجموعات. ففي ذلك الوقت، كان الرياضياتيون يقبلون بأن وجود **المجموعة الشاملة**[1] ـ وهي المجموعة التي تحوي كل شيء ـ شيء مسلّم به. فقد بدت المجموعة الشاملة طبيعية وواضحة جدا، لكن كثيرا من محيرات نظرية المجموعات نشأت نتيجة افتراض وجود تلك المجموعة، الذي أثبت الرياضياتيون الآن خطأه. وفي رأيي، فإن المعرفة المشتركة للعقلانية، التي يقبل بها علماء نظرية المباريات، تواجه مصيرا مشابها.



مسألة غير محلولة[*]

لكن التحدي الباقي ليس هو تفسير السلوك الحقيقي للناس العاديين أمام لعبة مأزق المسافرين. ويعود الفضل جزئيا إلى التجارب التي أوضحت أن من المحتمل أن تكون الغيرية والتكيف الاجتماعي، والمحاكمة الخاطئة، هي التي توجه معظم اختيارات الأفراد. غير أنني لا أتوقع أن يختار كثير من الناس 2، إذا استُبعدت هذه العوامل الثلاثة جميعها من الصورة. تُرى، كيف نستطيع تفسير ذلك إذا واصل حقا معظم الناس اختيار أعداد كبيرة، ربما في شريحة التسعينات، حتى لو لم يكونوا مفتقرين إلى القدرة على الاستنتاج، وكانوا يكبتون غيريّتهم الطبيعية وسلوكهم الاجتماعي كي يلعبوا بقلب قاس، في مسعى للحصول على أكبر قدر ممكن من المال؟ وخلافا للقِسْم الأكبر من نظرية المباريات الحديثة، الذي يمكن أن يستعمل فيه قدر كبير من الرياضيات، التي يسهل استيعابها من قِبَل من يعرفون التقنيات الرياضية، فهذا سؤال صعب يتطلب تفكيرا إبداعيا.

لنفترض أنا وأنت اثنين من اللاعبين الحاذقين والقساة القلوب. فما الذي يمكن أن يدور بخلدنا؟ أنا أتوقع أنك ستختار عددا كبيرا وليكن في المجال من 90 إلى 99؛ عندئذ يجب عليّ ألا أختار 99. لأنه أيا كان العدد الذي تختاره من هذا المجال، فإن اختياري للعدد 98 سيكون جيدا أو أفضل بالنسبة إليّ. لكنك إذا كنت تنطلق من المعرفة نفسها للسلوك البشري غير الرحيم، مثلما أفعل أنا، واتبعت المنطق نفسه، فإنك ستعتمد 99 خيارا لك ـ وباستعمال النوع نفسه من المحاكمة العقلية التي كانت ستجعل لوسي و باسل يختاران 2، فسرعان ما نلغي كل عدد من 90 إلى 99. لذا من غير الممكن جعل مجموعة «الأعداد الكبيرة، التي قد يختارها منطقيا ذوو القلوب القاسية،» مجموعة محددة تماما، ونكون دخلنا حقل المعرفة الصعب فلسفيا وذلك بإعمال العقل في فذلكات منطقية ذات طبيعة أساسية غير محددة جيدا.

ولو تعين عليّ أداء هذه اللعبة، لقلت لنفسي: «انسَ منطق نظرية المباريات واختر عددا كبيرا (ربما كان 95)، وأنا أعرف أن غريمي سيختار شيئا مشابها، وسيتجاهل كلانا الحجة المنطقية بأن العدد الأصغر التالي سيكون أفضل من أي عدد نختاره.»

وما يثير الاهتمام أنه يرتبط بهذا الرفض للعقلانية والمنطق نوع من «**ما وراء العقلانية**»[2]. وإذا سلك كلا اللاعبيْن الطريق ما وراء العقلاني هذا، فسيكون كل منهما على ما يرام. وفكرة السلوك المولّد بالرفض العقلاني للسلوك العقلاني شيء يصعب إعطاؤه صيغة معينة. لكن فيه تكمن الخطوة الواجب اتخاذها في المستقبل لحل **المحيِّرات العقلانية**[3] التي تزعج نظرية الألعاب، **والمكودة**[4] في لعبة مأزق المسافر. ■

(*) Unsolved Problem
(1) universal set
(3) paradoxes of rationality
(5) welfare economics
(2) meta-rationality
(4) codified
(6) Econometric Society

المؤلف

Kaushik Basu

*أستاذ علم الاقتصاد في جامعة كارل ماركس للدراسات الدولية، ومدير مركز علم الاقتصاد التحليلي في جامعة كورنل. نشر عددا كبيرا من المقالات في مجلات أكاديمية تعنى بتطوير علم الاقتصاد، **واقتصاد الرخاء**[5]، ونظرية المباريات، والتنظيم الصناعي. وهو يكتب، أيضا، مقالات في وسائل الإعلام الشعبية. وله عمود شهري في BBC News online وهو زميل في **جمعية الاقتصاد القياسي**[6].*

مراجع للاستزادة

On the Nonexistence of a Rationality Definition for Extensive Games. Kaushik Basu in *International Journal of Game Theory*, Vol. 19, pages 33–44, 1990.

The Traveler's Dilemma: Paradoxes of Rationality in Game Theory. Kaushik Basu in *American Economic Review*, Vol. 84, No. 2, pages 391–395; May 1994.

Anomalous Behavior in a Traveler's Dilemma? C. Monica Capra et al. in *American Economic Review*, Vol. 89, No. 3, pages 678–690; June 1999.

The Logic of Backwards Inductions. G. Priest in *Economics and Philosophy*, Vol. 16, No. 2, pages 267–285; 2000.

Experts Playing the Traveler's Dilemma. Tilman Becker et al. Working Paper 252, Institute for Economics, Hohenheim University, 2005.

Instinctive and Cognitive Reasoning. Ariel Rubinstein. Available at arielrubinstein.tau.ac.il/papers/Response.pdf

Scientific American, June 2007

البحث عن الكود العصبي(*)

إن معرفة الكيفية التي تُفلت وفقها الجرذان من القطط تكشف كيف تُترجم إلى معلومات عاصفةٌ من النبضات التي تكتسح الدماغ.

<M. A. L. نيكوليليس> - <S. ريبيرو>



حينما انفتحت فجأةً الأبواب الانزلاقية بتحكم حاسوبي كاشفة حجرة دامسة الظلام، ولكنها مألوفة بالفعل للجرذة إيش، قامت الجرذة إيش بالضبط بما كان متوقعا منها بعد كل هذه الأسابيع من التدريب القاسي. فاندفعت بقوة دون تردد داخل الحجرة الضيقة، متحركة بأقصى سرعة نحو الجدار المقابل، ومتأثرة على الأرجح بالمكافأة التي كانت متأكدة من الحصول عليها نظرا لأدائها الممتاز في الآونة الأخيرة، وكانت على أتم استعداد لاستعراض مهاراتها والتباهي بها.

لقد بدأت التجربة لحظة اجتياز الجرذة إيش حزمةً من الأشعة الضوئية تحت الحمراء أمام فتحة موضوعة في مسار عَدْوِها مباشرة. كانت هذه الفتحة، المطوقة من الجانبين بذراعين صغيرين لقضيبين معدنيين كل منهما على شكل الحرف T يبرزان من جانبي الحجرة، تحدد حيزا (شقا صغيرا) ضيقا، وعلى الجرذة إيش أن تمر من خلاله لتصل إلى الجدار المقابل. وكان العمل الذي عليها أن تقوم به أبعد ما يكون عن التفاهة، إذ كان عليها في محاولة واحدة أن تقدر قطر الفتحة بأسرع ما يمكن. ولجعل الأمور أكثر تعقيدا وإثارة للاهتمام كان حجم الفتحة يتغير عشوائيا من تجربة إلى أخرى. ولم يكن أمام الجرذة إيش وهي غير قادرة على رؤية القضيبين إلا سبيل واحد لبلوغ هدفها ألا وهو الاعتماد كلية على حسها اللمسي الشديد الحساسية.

لقد تمكنت الجرذة إيش على نحو مثير للدهشة في 90% من التجارب أن تميز على نحو صحيح ما إذا كانت الفتحة أضيق أو أوسع من ذي قبل، حتى عندما لم يتغير قطر الفتحة إلا بمقدار مليمترين فقط. واستطاعت أن تحل هذا اللغز اللمسي بالكاد في 150 جزءًا من الألف من الثانية بلمس حافات القضيبين بأطراف الأشعار الطويلة البارزة التي تنبت من جانبي وجهها فقط. لم تكن حيلة الجرذة إيش عملا بسيطا من المنظور البشري، فأي شخص يحاول إنجاز مهمة أو حل مسألة مماثلة بوضع شاربه أو لحيته على الفتحة نفسها كان سيفشل فشلا مخزيا مثيرا للرثاء.

لكن إيش جرذة. وقاعدة كل شعرة من أشعار شاربيها تحتوي على كثافة عالية جدا من الأعضاء الحسية المحيطية المتخصصة المعروفة بالمستقبلات الميكانيكية التي تترجم الخصائص الرئيسية للمنبهات اللمسية إلى لغة يستطيع الدماغ أن يفهمها ألا وهي الكهرباء. تنتقل مثل تلك الإشارات الكهربائية في الجرذان كما في البشر بواسطة عدد وافر من الأعصاب المحيطية الموجودة في جميع أنحاء الجسم إلى تراكيب دماغية متعددة مترابطة فيما بينها فتتكون بذلك دائرة عصبية ضخمة تعرف بالجهاز الحسي الجسدي المسؤول عن ذخيرتنا المتسعة من الأحاسيس اللمسية. تسهم هذه الدائرة نفسها أيضا في نشوء معظم خبرتنا الإدراكية الشخصية، أي إحساسنا الخاص بذاتنا.

لكن لا تزال منذ زمن بعيد وإلى الآن الكيفية المضبوطة التي يترجم بها الدماغ هذه اللغة من النبضات الكهربائية إلى مثل تلك المدارك الحسية الدقيقة والمتنوعة لغزا عويصا يصعب فهمه، وواحدا من أبحاث الدماغ المقدسة المضنية التي تتطلب بحثا طويلا جاهدا. إن **حل (فك)**[1] هذا الكود العصبي هو بمثابة فتح الأبواب لفهم ماهية هويتنا. إذ تنبثق قدراتنا على التحدث والحب والكراهية وإدراك العالم من حولنا وكذلك ذكرياتنا وأحلامنا، وحتى تاريخ جنسنا البشري من تجميع حشد من الإشارات الكهربائية البالغة الصغر التي تنتشر عبر أدمغتنا تماما مثلما تكتسح عاصفة رعدية السماء في ليلة صيف.

خطوط مستقيمة على نحو خادع[**]

كانت الجرذة إيش تشارك دون أن تعلم في تجربة صممت لمواجهة هذا السؤال المحوري جدا. أما كونها قد قررت أن تستخدم شعر وجهها لإنجاز هذه المهمة، فذلك كان مجرد أمر صائب فقط. فعندما تكون الجرذان في حاجة فعلية إلى الفرار من القطط بالاندفاع عبر فتحةٍ حجمها غير محدد وواقعة في مكان ما في أحد جدران مكان مظلم غير مألوف، فإن أشعار شواربها تمنحها أفضل أمل للنجاح.

تترجم مستقبلات الجرذ الميكانيكية أي انحراف ميكانيكي صغير جدا لأشعار الشوارب إلى سلاسل متتالية سريعة من التفريغات الكهربائية الصغيرة التي تعرف **بجهود الفعل الكهربائي**[2] لتبلِّغ بالإشارة موضع المنبهات اللمسية وشدتها ومدتها. تنتقل هذه النبضات إلى الدماغ عبر الجهاز الثلاثي التوائم، وهو الشبكة العصبية التي تكون الجزء من الجهاز الحسي الجسدي المتخصص بنقل الإشارات اللمسية الواردة من الوجه ومعالجتها. لذلك فإن فهمنا للكيفية التي تحسب بها الجرذة إيش وغيرها من الجرذان بمنتهى السرعة واليسر قطر فتحة ما في مجرد جزء من الثانية مستخدمة فقط المعلومات الحسية التي تجمعها أشعار شواربها يرتكز على توضيح كيف تتآثر المجموعات الضخمة من العصبونات الموزعة عبر الجهاز الثلاثي التوائم لمعالجة تلك المعلومات الحسية الواردة.

يكشف البحث في هذه المسألة بالطبع عما هو أكثر بكثير من مجرد معرفة كيف تراوغ الجرذانُ القلقة القططَ الجائعة. لقد قام علماء الفزيولوجيا العصبية بالفعل منذ بداية سبعينات القرن العشرين بدراسة الجهاز الثلاثي التوائم في القوارض لمحاولة الإجابة عن الأسئلة الجوهرية المتعلقة بطبيعة الكود العصبي. إن العمل الذي نقوم به في مختبرنا والذي يقوم به آخرون في كثير من المختبرات في جميع أنحاء العالم من أجل حل شفرة هذا الكود يوضح فقط كيف تطورت الفرضيات العلمية بشكل مثير منذ ذلك الحين، وكذلك القدر الهائل الذي لا يزال علينا أن نتعلمه بعد.

لقد كانت النظرية التي يفضلها معظم علماء الأعصاب منذ ثلاثة عقود هي تلك النظرية المعروفة **بنموذج الخط الموسوم**[3]، لأنها اقترحت أن المعلومات الحسية المتولدة في محيط الجسم تنتقل عبر مسارات عصبية متوازية على طول الطريق إلى القشرة المخية الجديدة للدماغ. ومن حيث الجوهر تنتقل الرسالة خلال **دائرة تغذية (تلقيم) تقدمية**[4] تماما لتصل المستقبلات الحسية المحيطية (مثل أشعار الشوارب) بالتراكيب الأعلى رتبة في الدماغ.

لقد لاقى هذا النموذج تأييدا ذا شأن مهم خلال السبعينات من القرن العشرين، عندما كشف <T. وولسي> و<H. فاندرلوس> [عالما

(*) SEEKING THE NEURAL CODE
(1) crack
(3) labeled-line model
(**) Deceptively Straight Lines
(2) action potentials
(4) strict feedforward circuit

التشريح العصبي في كلية الطب بجامعة جونز هوبكنز] النقاب عما بدا أنه خطوط الاتصال المادية داخل **القشرة المخية الحسية الجسدية الأولية** primary somatosensory cortex (S1) في دماغ الفأر. ويمكن تقسيم القشرة المخية في الفأر، كما في الثدييات الأخرى، إلى ست طبقات على أساس النسيج المميز لكل منها وتوزيع أنماط الخلايا العصبية بها، وترقيمها من I إلى VI من سطح الدماغ الخارجي الأقصى إلى الطبقة القشرية الداخلية. وباستخراج **كتل نسيجية تحوي القشرة المخية S1**(1) للفأر بكاملها، تمكن «وولسي» و«فاندرلوس» من تحضير شرائح رقيقة متماسة تغطي النطاق القشري المخي بأكمله، ثم صبغ تلك المقاطع النسيجية للكشف عن وجود أكسيداز السيتوكروم، وهو إنزيم ميتوكندري (مُتَقدَّري) مرتبط بالنشاط الخلوي المكثف.

ولقد أدهش «وولسي» و«فاندرلوس» ما اكتشفاه من احتواء الطبقة القشرية المخية IV على عناقيد متعددة متمايزة من العصبونات الغنية بأكسيداز السيتوكروم، ومنظمة تنظيما جيد التخطيط من الصفوف والأعمدة. وقد كونت آلاف من العصبونات المتراصة بإحكام كل **عنقود برميلي الشكل**(2). وهذا حث الباحثين على تسمية العنقود الواحد بالبرميل والمطرس (المادة البينخلوية) بالحقل البرميلي. والأكثر إثارة للدهشة أن هذا الحقل البرميلي كان يحدد خريطة جميلة، ولو أنها محرفة بعض الشيء، لخطم (مقدم فم وأنف) الفأر.

وسرعان ما وُجد نسق حقل برميلي مماثل في القشرة المخية للجرذ [*انظر المؤطر في الصفحة المقابلة*]. وكشف المزيد من الدراسات عن وجود مثل تلك الخرائط الطوبوغرافية في تراكيب تحت قشرية منها جذع الدماغ والمهاد حيث لقبت العناقيد بالبريملات وأشباه البراميل. ولقد أظهر بالفعل باحثون لاحقون أن تكدسات من هذه الخرائط الطوبوغرافية في كل واحدة من المحطات (التوصيلات) تحت القشرية بالجهاز الثلاثي التوائم تصل المستقبلات الحسية المحيطية الموجودة في أشعار وجوه الجرذان بالقشرة المخية S1 على طول الطريق فيما بينهما.

ويستخدم علماء الفزيولوجيا العصبية الحسية مصطلح «الحقل الاستقبالي»(3) لتحديد مقدار الجلد الذي يتسبب عند تنبيهه في استجابة عصبون بإنتاج جهود فعل كهربائي (كمونات عمل). وبناء عليه كان التنبؤ الأكثر أهمية لنموذج الخط الموسوم في حالة الجهاز الحسي الجسدي للقوارض أن الحقل الاستقبالي أو الحقل الحيزي للعصبون الفردي الواقع في أحد هذه البراميل الثلاثية التوائم سيقتصر على شعرة شارب رئيسية واحدة.

ولكن بحلول أواخر ثمانينات القرن العشرين بدأت نتائج مناقضة تتحدى هذه **الرؤية الخطية الصرفة**(4). فعلى سبيل المثال، سجل عالم الفزيولوجيا العصبية «M. أرمسترونك-جيمس» [في جامعة لندن] حينذاك نشاط عصبونات فردية واقعة في عدة براميل قشرية مخية لجرذان مخدرة. ومع استطاعته تحديد شعرة الشارب الرئيسية لمعظم هذه العصبونات القشرية المخية، أثبت أيضا أن العصبون الفردي كان قادرا على الاستجابة لانحراف أشعار الشارب المحيطة بتلك الشعرة الرئيسية.

لقد اقترح «أرمسترونك-جيمس» في استنتاج شبه ابتداعي (شبه هرطقي) بالنسبة إلى زمانه، أن الحقول الاستقبالية للعصبونات الفردية في القشرة المخية البرميلية للجرذ لم تقتصر على أشعار أولية فردية، بل اشتملت الحقول الحيزية بدلا من ذلك على بضع أشعار محيطة تدفع عند انحرافها العصبونات إلى إحداث استجابات حسية أضعف وأبطأ، ولكن مع ذلك يعتد بها. لقد كانت هذه الفكرة كافية لإحداث خلاف كبير في هذا المجال، ومع ذلك كانت مجرد بداية عقد انتقالي لفهم العلماء التكويد العصبي.

حوسبة مُوَزَّعة(**)

إن التقنية التي استخدمها «أرمسترونك-جيمس» لتسجيل نشاط العصبونات الفردية (كل منها على حدة) في الجرذان المخدرة، كانت هي تقريبا الطريقة الرسمية المقررة في عام 1989. وذلك عندما قرر واحد منا (وهو نيكوليليس) مع «J. K. شابين» [الذي يعمل حاليا في جامعة الولاية بنيويورك في المركز الطبي التابع لها في القلب التجاري للمدينة] أن يطبقا طريقة جديدة للإصغاء إلى النشاط الكهربائي لعدة عصبونات فردية في آن واحد.

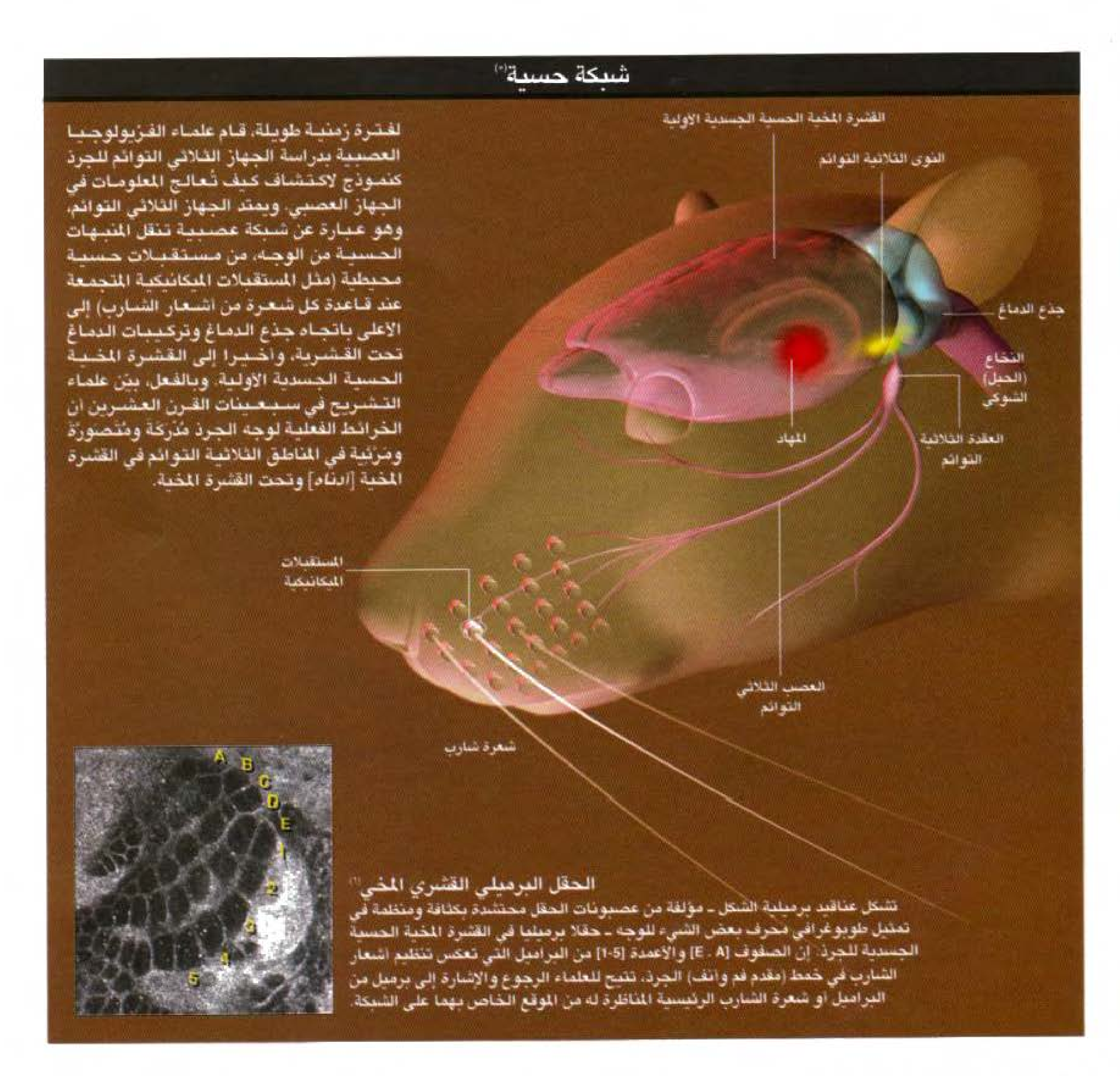
في البداية، ركزنا على العصبونات الواقعة في أشباه البراميل **بالنواة الجوانية (الإنسية) الخلفية البطنية** ventral posterior medial nucleus (VPM)، وهي تركيب يوجد في المهاد ويعد المصدر الرئيسي للاتصالات العصبية الصاعدة إلى **الحقول البرميلية**(5) في القشرة المخية الحسية الجسدية الأولية. أظهرت دراساتنا الأولى أن عصبونات النواة VPM أظهرت حقولا استقبالية واسعة جدا لأشعار شوارب متعددة. وعلى غرار ما وجده «أرمسترونك-جيمس» في القشرة المخية، نتجت الاستجابات الأقوى والأسرع لعصبونات VPM من انحراف شعرة الشارب الرئيسية لكل عصبون منها محددة مركز حقله

نظرة إجمالية/ كود منبثق(*)

- **إن العواصف من النبضات الكهربائية التي تكتسح الجهاز العصبي المركزي، تُترجَم بطريقة أو بأخرى إلى أفكار وانفعالات وأحاسيس. وقد قضى علماء الأعصاب عقودا من الزمان في محاولة حل شفرة هذه اللغة العصبية.**
- **لقد تصورت الفرضيات المبكرة بشأن الإدراك الحسي أن الإشارات تنتقل انتقالا خطيا صرفا على طول طرق عصبية غير مترابطة (منفصلة) فيما بين مستقبلات المنبهات ومراكز المعالجة العليا في الدماغ.**
- **لقد كشفت مراقبة مجموعات كبيرة من العصبونات في المسارات الحسية عن حقيقة أخرى بديلة، وهي أن المعلومات تُشفَّر في نُسُق الأنشطة الزمانية المكانية للمجموعات العصبية بأكملها.**

(*) Overview/ An Emerging Code
(**) Distributed Computing
(1) somatosensory cortex
(2) barrel shaped cluster
(3) receptive field
(4) neat linear view
(5) barrel fields

شبكة حسية(*)



الحقل البرميلي القشري المخي(1)

تشكل عناقيد برميلية الشكل - مؤلفة من عصبونات الحقل محتشدة بكثافة ومنظمة في تمثيل طوبوغرافي محرف بعض الشيء للوجه - حقلا برميليا في القشرة المخية الحسية الجسدية للجرذ. إن الصفوف [A . E] والأعمدة [1-5] من البراميل التي تعكس تنظيم أشعار الشارب في خطط (مقدم فم وأنف) الجرذ، تتيح للعلماء الرجوع والإشارة إلى برميل من البراميل أو شعرة الشارب الرئيسية المناظرة له من الموقع الخاص بهما على الشبكة.

الاستقبالي، في حين انطلقت استجابات أضعف وأبطأ من تنبيه الأشعار المحيطة.

في الحقيقة، ازداد حجم الحقول الاستقبالية للعصبونات VPM الفردية ازديادا ملحوظا مع تناقص مستوى تخدير الجرذان حتى إفاقتها تماما في النهاية، حيث إنها شملت أحيانا معظم الأشعار الوجهية على الجانب نفسه من وجه الجرذ. وإضافة إلى ذلك، لما كانت العصبونات VPM تستجيب لتنبيه الأشعار الوجهية المختلفة بعد فترات كمون أو تأخير مختلفة (وهي فترات فاصلة بين التنبيه والاستجابة)، فإن الحقل الحيزي للحقل الاستقبالي لكل عصبون ترحزح وفقا للزمن التالي للمنبه. وبتعبير آخر، كنا لا نستطيع في الواقع أن نحدد مركز الحقل الاستقبالي لعصبون معين وحدوده إلا إذا عيَّنا لحظة زمنية محددة.

إن هذا المظهر الزماني المكاني الديناميكي لاستجابات العصبونات قد أتاح الفرصة أيضا للخلايا أن تعيد تنظيم ردود أفعالها فورا بعد أي تغير في تدفق المعلومات اللمسية من محيط الجسم. فعلى سبيل المثال، عندما قمنا بمجرد تخدير رقع صغيرة من جلد وجه الجرذ تمكنا من مشاهدة إعادة تنظيم تامة للحقول الاستقبالية للعصبونات VPM في غضون بضع ثوانٍ لتتلاءم مع النسق الجديد للمعلومات اللمسية الواردة.

وقد تابعنا هذه النتائج وأعقبناها بتجارب أكثر تحدٍّ من الناحية التقنية، تتضمن مراقبة نشاط عينات أكبر من العصبونات الفردية في محطات (توصيلات) متعددة من جهاز الجرذ الثلاثي التوائم، تقع في جذع الدماغ والمهاد والقشرة المخية. وقد منحتنا تسجيلاتنا المتزامنة المتعددة المواقع والمتعددة المساري الكهربائية عينات لعصبونات فردية يصل عددها إلى 48 عصبونا لكل حيوان في آن واحد موزعة عبر عدد من التراكيب العصبية

(*) A SENSORY NETWORK
(1) cortical barrel field

تقارب الإشارات وتلاقيها[*]

إن تنبيه أشعار الشوارب الفردية على وجه الجرذ يكشف عن شبكة معقدة من التفاعلات الموزعة[1] عبر مجموعات من العصبونات وعلى مر الزمن. وهكذا يتم تكويد المعلومات الحسية الواردة من شعرة شارب واحدة في نسق الاستجابات الزمانية المكانية بواسطة عدد كبير من الخلايا الموجودة في كل مكان بالجهاز الثلاثي التوائم للحيوان.

استجابات المجموعة الخلوية

يُحدث تنبيهُ شعرة شارب فردية موجات من النشاط الكهربائي في عناقيد خلوية برميلية الشكل في جذع الدماغ (SPv و PrV) والمهاد (VPM) والقشرة المخية (S1).

القشرة المخية الحسية الجسدية الأولية (S1)

النواة الجوّانية (الإنسية) الخلفية البطنية (VPM)

النواة الثلاثية التوائم النخاعية (SPv)

النواة الثلاثية التوائم الرئيسية (PrV)

مجموعة برميلية فردية

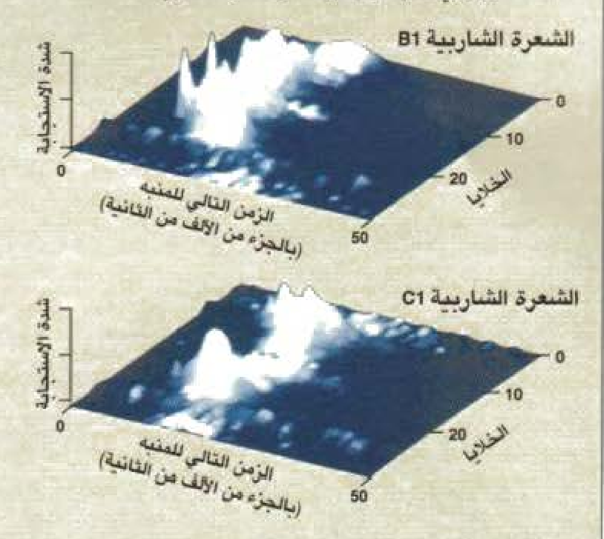
الخلايا

0 — 50

الزمن التالي للمنبه (بالجزء من الألف من الثانية)

استجابات المجموعة العصبونية

بدلا من الاستجابة لشعرة شارب رئيسية واحدة فقط، يتفاعل 25 عصبونا في أعمدة برميلية قشرية مخية مختلفة مع تنبيه أشعار شاربية مختلفة بأنماط استجابة متمايزة [أدناه]. يصور كل صف النشاط الكهربائي لخلية فردية بعد تنبيه شعرة الشارب.



المختلفة يصل إلى خمسة.

لقد كانت هذه هي المرة الأولى التي يجري فيها على الإطلاق أخذ عينات حيزية على نحو شامل من المسار الحسي للحيوان. وقد كانت النتيجة واضحة بقدر ما كانت مثيرة للذهول؛ فانحرافات شعرة الشارب الفردية في الحيوانات اليقظة أطلقت موجات معقدة من النشاط الكهربائي، انتشرت عبر عدة عناقيد برميلية الشكل داخل كل تركيب من التراكيب العصبية الواقعة على طول الجهاز الثلاثي التوائم (*انظر المؤطر في هذه الصفحة*). لم يكن ما كنا نشاهده متناغما على الإطلاق مع انتقال المعلومات على طول خطوط موسومة ساكنة منعزلة عن بعضها؛ وإنما أوحت لنا نتائجنا بدلا من ذلك بالنموذج المعروف بالتمثيل الموزع أو **بالكود العصبي المجموعي**[2]. حيث لا يكون دماغ الجرذ قادرا على استخلاص معلومات حسية دقيقة وذات معنى عن البيئة المحيطة بالحيوان مباشرة إلا بضم أنشطة مجموعات كبيرة من العصبونات الفردية.

ولاختبار هذه المشاهدة (الملاحظة) إلى مدى أبعد، حاول <A. گزنفر> [وهو طالب دراسات عليا في مختبرنا] في منتصف تسعينات القرن العشرين، «قراءة» الرسائل المكودة التي ترسلها مجموعات العصبونات الثلاثية التوائم في الجرذ. وقد فعل ذلك بتغذية سلسلة من لوغاريتمات تمييز النسق الصنعية (المعروفة **بالشبكات العصبية الصنعية** (artificial neural networks (ANNs)) بأنشطة الكثير من العصبونات القشرية المخية التي تم الحصول عليها أثناء التنبيه الميكانيكي للعديد من أشعار الشارب الفردية. في البداية قام <گزنفر> بتدريب واحد من اللوغاريتمات على استخدام نسق الإثارة الزمانية المكانية لمجموعات كاملة من العصبونات القشرية المخية لتصنيف مواقع منبهات شعرة الشارب الفردية؛ ثم بمجرد أن بلغت الشبكات ANNs مستوى عاليا من الدقة، قام بإدخال مجموعة جديدة من البيانات، ثم بقياس مدى جودة إمكانية تنبؤ اللوغاريتمات بموقع شعرة الشارب المنبهة. وعندما تمت تغذية الشبكات ANNs بأنشطة العصبونات الفردية منعزلة كانت دقة تنبؤاتها منخفضة للغاية. ولكن عندما تمت تغذيتها بالاستجابات المجتمعة لمجموعات العصبونات الفردية، تمكنت اللوغاريتمات بسهولة من التنبؤ بالموقع الصحيح لمنبه شعرة الشارب من محاولة واحدة.

وفي الوقت نفسه، كانت مختبرات أخرى تحصل باستخدامها مجموعةً متنوعة من الطرائق على بيانات تؤيد

CONVERGING SIGNALS (*)
reactions distributed (1)
population neural code (2)

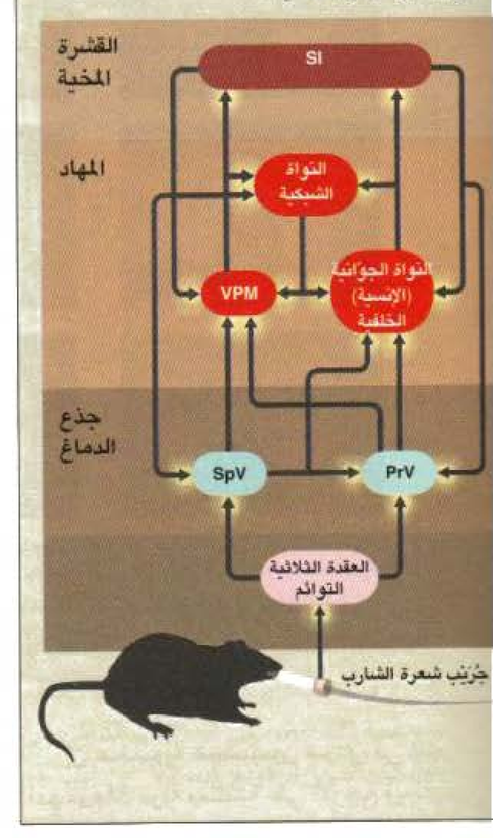


طبقات القشرة المخية للجرذ.

لن يتمكن الدماغ من استخلاص معلومات ذات مغزى إلا بضم أنشطة المجموعات العصبونية.

مسارات الإشارات الثلاثية التوائم

يتم تعديل الإشارات اللمسية الواردة من الشعرة الشاربية بواسطة إشارات عصبية تنتقل على طول روابط جانبية ونازلة بين تراكيب الدماغ.



نتائجنا الكهربائية الفزيولوجية. ولقد واصل <گزنفر> مع <D. كروبا> [الحاصل على زمالة ما بعد الدكتوراه] جهودهما ليثبتا أول مرة أن إحصار النشاط العصبوني في القشرة المخية S1 يؤثر في استجابات العصبونات VPM في المهاد، وهذا يوحي بأن إشارات **الارتجاع**[1] النازلة من القشرة المخية إلى النواة VPM يمكن أن تؤدي أيضا دورا مهما في تعديل المعلومات الصاعدة من جذع الدماغ. وقد أدت هذه النتائج مع مثيلاتها إلى اقتراح مجموعتنا البحثية أن الاستجابات اللمسية للأشعار الشواربية المتعددة ذات الديناميكية العالية المشاهدة في كل من العصبونات S1 و VPM كان يحددها عدد وافر من الإشارات المعدلة الصاعدة والهابطة والمتنقلة جانبيا والتي تتقارب للالتقاء عند كل واحد من هذه العصبونات في لحظة زمنية مختلفة.

لقد كانت نتائجنا بالفعل بعيدة كل البعد عن **نظرية الخط الموسوم ذي التغذية التقدمية المتزمتة**[2]. ولكن لا يزال الكثير من التنبؤات المشتقة من نموذجنا التقاربي الالتقائي اللاتزامني يتطلب اختبارات تجريبية مكثفة، وهذا قادنا إلى رحلة بحثية أخرى لعقد من الزمان نقوم فيها بتنبيه أشعار شوارب الجرذان بمجموعة من الوسائل لم يسبق تجربتها قط.

القرائن تؤخذ بعين الاعتبار[3]

في عام 1998، قامت <E. فانسيلو> [وهي طالبة دراسات عليا في مختبرنا] بتصميم تقنية بارعة لقياس كيفية استجابة العصبونات S1 و VPM لمنبهات متشابهة في ظروف مختلفة في الجرذان الحرة الحركة. لقد تمكنت <فانسيلو> - عن طريق زرع مسرى كهربائي على هيئة قيد بالغ الصغر حول العصب تحت الحجاج، وهو فرع العصب الثلاثي التوائم الوارد من الأشعار الوجهية - من توصيل متتاليات دقيقة من النبضات الكهربائية إلى العصب في الوقت نفسه الذي تقاس فيه استجابات العصبونات S1 و VPM وبعد ذلك قامت بقياس كيف تغيرت تلك الاستجابات العصبونية أثناء مختلف السلوكيات التي تظهر على الجرذان وهي تتجول تجوالها الروتيني اليومي. وكشفت هذه التجارب أنه عندما تحرك الجرذان أشعار شواربها تختلف جدا الطريقة التي تستجيب بها عصبوناتها القشرية المخية والمهادية للمنبهات اللمسية عن طريقة استجابتها عندما تكون هذه الحيوانات نفسها يقظة أو مخدرة.

وفي الجرذان الساكنة، كانت هذه العصبونات تستجيب للتنبيه على نحو تقليدي بمتتالية قصيرة من جهود الفعل الكهربائي (كمونات العمل)، تعقبها فترة زمنية طويلة الأمد يُثبَّط فيها إطلاقها للدُّفعات (الدفقات) العصبية بفعل تغيرات تحدث في أغشيتها الخلوية. ولكن <فانسيلو> وجدت أنه عندما تحدث الجرذان تحركا من أي نوع لأشعار شواربها، تطلق عصبوناتها القشرية المخية والمهادية الدفعات العصبية على نحو أكثر اطّرادا، استجابة لنبضة عصبية كهربائية فردية دون أي فترات تثبيط على الإطلاق.

لقد حثتها هذه الملاحظة على محاولة توصيل متتاليات من نبضتين كهربائيتين إلى العصب بدلا من متتاليات من نبضات فردية. وكانت النتيجة مذهلة. عندما كانت الجرذان يقظة ولكنها ساكنة ولا تحرك أشعار شواربها، كانت عصبوناتها القشرية المخية والمهادية تستطيع الاستجابة فقط للمنبه الأول من زوج المنبهات، في حين كان الآخر يُحْجَب بالتثبيط التالي للإثارة. ولكن عندما كانت الجرذان تحرك أشعار شواربها بنشاط، تمكنت عصبوناتها S1 و VPM من الاستجابة بشكل جيد جدا لكل من النبضتين الكهربائيتين، حتى عندما لم يكن يفصل بينهما إلا 25 ميكروثانية (25 جزءا من المليون من الثانية). إن الانهماك في سلوك تحريك أشعار الشوارب بخفة وسرعة قد غيَّر بوضوح خواص العصبونات، وهذا أتاح للقشرة المخية والمهاد تمثيل متتالية من المنبهات اللمسية تمثيلا صحيحا.

وفي أثناء هذه الفترة الزمنية، بدأ <كروبا> بالنجاح في تدريب الجرذان على أداء المهمة نفسها التي سوف تبرع في أدائها الجرذة إيش فيما بعد في غضون بضع سنوات. لقد قدمت هذه الطريقة وسيلة جديدة لاختبار فيما إذا كانت استجابات العصبونات تختلف أيضا، عندما يصبح لمهمة التمييز اللمسي النشيط للحيوان مغزى ومتطلبات أكثر، أي أكثر شبها بالحياة الحقيقية، مثل استخدامه شعرَ وجهه ليقدر

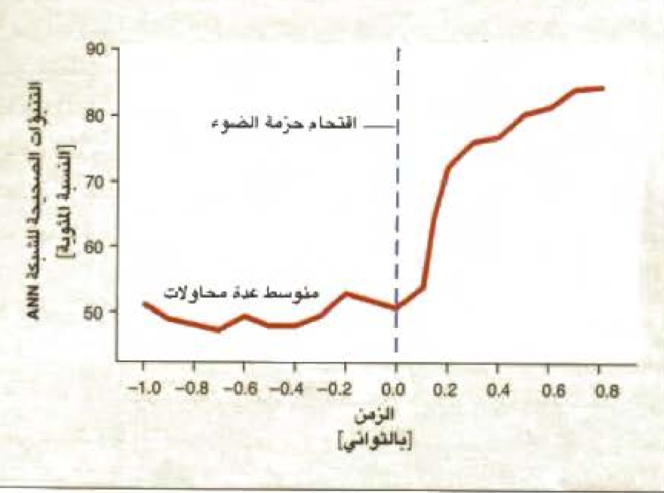
(1) feedback، أو الاسترجاع؛ التغذية الراجعة؛ التلقيم المرتد.

(2) strict feedforward, labeled-line theory

(3) Context Counts

قراءة عقل جرذ(*)

إن القدرة على التنبؤ بسلوك الجرذ تثبت أن لوغاريتم تعرّف النسق يستطيع أن يحل شفرة المعلومات الحسية المكودة في نشاط الحيوان العصبي. فعندما تُغذَّى (تلقم) شبكة عصبية صنعية (ANN) بتسجيلات من أدمغة الجرذان المشتركة في التجربة المبينة في *اليسار*، فإنها يمكن أن تحدد فيما إذا كان الحيوان سيميز اتساع الفتحة تمييزا صحيحا أو لا. وكما هو متوقع، كان أداء الشبكة ANN (*الرسم البياني*) عند مستوى الصدفة قبل اقتحام الجرذان لحزمة الضوء عند مدخل الحجرة التجريبية [0 ثانية]. وبعد أن بدأت الحيوانات تستكشف الفتحة بواسطة أشعار شواربها [0.1 إلى 0.25 ثانية]، ارتفعت دقة تنبؤ اللوغاريتم بسرعة.



فتحة واسعة

فتحة ضيقة









في هذه التجربة، استخدم الجرذ أشعار شاربيه لتحسس الفتحة المكونة بواسطة قضيبين متحركين بطوقان نتوءًا أنفيا nose poke، ثم اتخذ الحيوان قراره بشأن تقدير حجم الفتحة بالبحث عن جائزة في غرفة خارجية في واحدة من محطتين كان قد تدرب لربطهما بـ «ضيقة» أو «واسعة».

قطر ثقب دائم التغير.

لقد أكدت نتائج «كروبا» ملاحظات «فانسيلو» السابقة ووسعت مداها؛ فعندما استخدمت الحيوانات أشعار شواربها استخداما نشيطا لتقدير قطر الفتحة، أظهرت نسبة مئوية كبيرة من عصبوناتها S1 و VPM استجابات قوية طويلة الأمد بلا تثبيط. إضافة إلى ذلك، بدأت عصبونات متعددة في القشرة المخية تغير بشكل واضح معدلات إطلاقها للدفعات العصبية قبل أن تلمس أشعار شوارب الجرذان حافات القضيبان بكثير. وهذا يوحي بأن حالة الجرذان السلوكية كانت تؤثر بالفعل في خواص العصبونات مُعِدَّة إياها للمهمة العصبية الحاسمة التي أمامها.

لقد قام «كروبا» بتغذية شبكة عصبية صنعية بأنماط الإثارة الزمانية المكانية لمجموعات العصبونات التي تم تسجيلها أثناء تنفيذ هذه المهمة، وذلك كبرهان نهائي يثبت أن هذه التأثيرات كانت أيضا جزءا من المعلومات المكودة للتغذية التقدمية والارتجاعية في داخل الجهاز الحسي للحيوان. لقد تمكنت الشبكة ANN بفضل اتحاد أنشطة نحو 50 عصبونا قشريا مخيا من التنبؤ بدقة بالغة بقدرة الجرذان على تحديد اتساع الفتحة أو ضيقها تحديدا صحيحا في أي تجربة.

شبكة ديناميكية(**)

إن قدرتنا على التنبؤ بسلوك الحيوان من أنماط الاستثارة العصبية وحدها قد أوحت لنا بأننا على المسار الصحيح نحو اكتشاف ترجمة للغة الجهاز العصبي. لقد كان جليا تماما أن دماغ الثدييات يعتمد على الأرجح على مجموعات عصبية واسعة الانتشار، تكونها على نحو ديناميكي خلايا متوافقة تماما، لتهب الحيوانات قدراتها الإدراكية الشديدة الحساسية بدلا من الاعتماد كليةً على نشاط عصبونات فردية متخصصة أو حتى أعمدة خطية من وحدات برميلية الشكل.

إن عضوية عصبون فردي في تلك المجموعات مرنة وسلسة على الأرجح ويمكن أن تتغير من لحظة إلى أخرى، كما يستطيع عصبون واحد أن يشترك في الكثير من هذه المجموعات في آن واحد. وتستطيع كذلك الخواص الاستثارية للخلايا الفردية أن تتغير باستمرار نتيجة لحالة المحيط الحسي والتجارب الإدراكية السابقة للحيوان وديناميكية دماغه الداخلية، سواء كانت تتخير العينات من البيئة المحيطة به إيجابيا أو سلبيا، وتوقعات الحيوان للمستقبل.

ونحن البشر نشترك مع الجرذان في الملامح الأساسية نفسها لبنية الدماغ وفزيولوجيته وبيولوجية خلاياه؛ ونجتاز مثلها محيطنا الحسي بمساعدة شبكات عصبية معقدة، تُولِّد تصورات متعددة عن العالم المحيط بنا وتشكل الإدراك من لحظة إلى أخرى بمقياس دقيق وفقا للتغير في الانتباه والدوافع والحالة المزاجية وتأخذ في الحسبان تجاربنا الحسية السابقة.

(*) READING THE MIND OF A RAT
(**) Dynamic Network



ولكن كيف يمكن أن تنبثق جميع هذه النواتج الثانوية من التفريغات الكهربائية البالغة الصغر لبلايين العصبونات؟ كيف يمكن أن تجعلنا أدمغتنا نتصرف كلنا بمثل هذا التشابه في بعض الأوقات، ومع ذلك تمنح كل واحد منا وجودا فريدا يتعذر نسخه. وسوف يتفق معظم علماء الأعصاب على أن التفاصيل المعقدة لهذا اللغز سيظل يكتنفها غموض عميق لبعض الوقت.

ومع ذلك، أتاح لنا بالفعل عمل مجموعتنا البحثية ـ الرامي إلى حل شفرة الكود العصبي من وضع فهمنا السطحي لهذه اللغة قيد الاستعمال العملي ـ قراءة أنماط الاستثارة العصبية من القشرة المخية الحركية للفرد واستخدام لوغاريتمات الحاسوب **لترجمة تلك المعلومات في الزمن الفعلي إلى تعليمات لتحريك ذراع إنسالة**(1). إن أملنا هو أننا يوما ما، قريبا، سنبرع أيضا في تركيب واستعمال الكلمات والعبارات بالقدر الكافي لمخاطبة الدماغ. وسوف يتيح لنا ذلك على سبيل المثال صنع ذراع بشرية صنعية بديلة مُحَمَّلة بأجهزة إحساس لإرسال **ارتجاع لمسي**(2) إلى القشرة المخية الحسية الجسدية للشخص الذي يستعملها.

ومع أن حل شفرة الكود العصبي مازال بعيد المنال، فبإمكاننا حاليا فهم بضعة مقاطع لفظية واستخدامها، علما بأن ذلك لم يكن أمرا واقعا منذ 10 سنوات فقط. إن واحدا من الأسباب المهمة التي تمكننا من استخدام هذه اللغة بالفعل منذ الآن هو تكيفها المتأصل فيها والذي ينشأ بدوره عن خواص الاتصال المتشابكة خلال المجموعات العصبية. وحتى لو سقطت بضع كلمات، تستطيع الرسالة العبور والوصول بالطريقة نفسها تقريبا التي تستطيع بها شبكةٌ تقانة التعويضَ السريعَ عن فقدان بضع عقد.

لقد كان لتطور التجهيزات والمعدات

كيف تستطيع أدمغتنا أن تمنح كل واحد منا هذا الوجود الفريد الذي يتعذر نسخه؟

التجريبية الأساسية تأثير حاسم في التقدم في هذا المجال. فقد كانت جهود علماء الأعصاب في العقود الماضية مقصورة على تسجيل نشاط العصبونات المنعزلة باستخدام مسار كهربائية معدنية صلبة كانت تُتلف نسيج الدماغ إذا ما حُرِّكَت بعنف أكثر من اللازم؛ ومن ثم كان الباحثون مجبرين على دراسة نشاط الدماغ، في حين أن الحيوان مخدر أو على الأقل تم تسكينه وتقييده. أما الآن، وكما أثبتت التجربة الخاصة بمجموعتنا البحثية، فبمجرد أن تمكن العلماء من الإصغاء لعشرات العصبونات في تراكيب دماغية متعددة في آن واحد، أصبحت الرؤية الجديدة للنشاط العصبي، على أساس مجموعي، ممكنة. كما جعلت مواد المساري الكهربائية المرنة الجديدة الغرس الدائم لأجهزة تسجيل في الدماغ أمرا ممكنا، وهذا أتاح لنا اليوم الإصغاء إلى نشاط ما يقرب من 500 عصبون فردي لفترات زمنية طويلة في الحيوان اليقظ المنشغل بممارسة سلوكيات طبيعية.

ولا عجب أن مراقبة العصبونات كل على حدة قد تكون هي التي ساعدت على تبني وجهة النظر الخطية المركزية العصبون للاتصال العصبي. فتلك الطرائق البدائية القديمة يمكن تشبيهها بالاستماع لصوت واحد فقط أثناء تأدية مسرحية موسيقية مغناة (أوبرا). فمهما كان المغني المنفرد موهوبا، فسيجد المرء صعوبة في متابعة المسرحية. ولكن عندما تتجمع العصبونات في مجموعات عصبية كبيرة موزعة على نطاق واسع، فستمنحنا **التآثرات الجماعية**(3) لهذه العصبونات أوصافا بالغة الدقة عن البيئة المحيطة بنا. وهكذا كلما فر جرذ من قطٍّ مهاجم، كانت نجاته على الأرجح بفضل سمفونية النبضات الكهربائية التي تُعْزَف في رأسه. ■

(1) robot arm [انظر: "Controlling Robots with the Mind," by Miguel A. L. Nicolelis - John K. Chapin, Scientific American, October 2002]

(2) tactile feedback

(3) collective interactions

المؤلفان

Miguel A. L. Nicolelis - Sidarta Ribeiro

لقد قاما باستقصاء التكويد العصبي معا عندما كان «ريبيرو» زميلا لما بعد الدكتوراه في مختبر «نيكوليليس» بجامعة ديوك. قام «نيكوليليس» [بصفته المدير المساعد لمركز ديوك للهندسة العصبية] و«A. W. دين» [أستاذة علم الأعصاب] بابتداع استخدام أغراس دماغية متعددة المساري الكهربائية لاستراق السمع لأنشطة أعداد كبيرة من العصبونات وتطوير طرائق حسابية لترجمة النتائج وتطبيقها. ويشترك كل من «نيكوليليس» و«ريبيرو» في ولعهما بنشر فوائد ووسائل علم الأعصاب المتقدم والمتطور. فهما مؤسسان مساعدان لمعهد ناتال العالمي لعلم الأعصاب في شمال شرق البرازيل. و«ريبيرو» هو المدير العلمي لمركز سيزار تيمولاريا للأبحاث والتعليم، وهو قسم بالمعهد يخطط أساسا لتجميع مؤسسة تدريب وأبحاث من الدرجة العالية في علم الأعصاب، ومؤسسات للتعليم المدرسي والصحة العقلية والرياضة، ومتحف للعلوم، ومحمية طبيعية، لتشجيع التنمية الاجتماعية والاقتصادية في هذه المنطقة النائية من البرازيل.

مراجع للاستزادة

Brain-Machine Interfaces to Restore Motor Function and Probe Neural Circuits. Miguel A. L. Nicolelis in *Nature Reviews Neuroscience*, Vol. 4, pages 417–422; May 2003.

Layer-Specific Somatosensory Cortical Activation during Active Tactile Discrimination. David J. Krupa et al. in *Science*, Vol. 304, pages 1989–1992; June 25, 2004.

Global Forebrain Dynamics Predict Rat Behavioral States and Their Transitions. Damien Gervasoni, Shih-Chieh Lin, Sidarta Ribeiro, Ernesto S. Soares, Janaina Pantoja and Miguel A. L. Nicolelis in *Journal of Neuroscience*, Vol. 24, No. 49, pages 11137–11147; December 8, 2004.

International Institute of Neuroscience of Natal: **www.natalneuroscience.com**

Scientific American, December 2006

Majallat AlOloom

مجلة العلوم

المجلد 23 - العددان 8/7

يوليو/أغسطس 2007

استخدام الهدروجين كوقود للسيارات (*)

يعمل الباحثون اليوم على إيجاد سبل تتيح للسيارات التي تعمل بخلايا الوقود التزود بالهدروجين الذي تحتاج إليه لقطع مسافات طويلة.

<S. سانيابال> - <ل. بيتروفيتش> - <G. توماس>



يصعب تخزين كمية كافية من غاز الهدروجين بالسيارات في خزان بحجم خزان الكازولين

(*) GASSING WITH HAYDROGEN

أدهش «ج. شارل» العالم حين حلّق في سماء باريس على ارتفاع 3000 قدم فوق سطح الأرض، في يوم من أواخر أيام صيف سنة 1783، في منطاد صنعه من قماش حريري مغلف بطبقة من المطاط ومعبأ بغاز الهدروجين، الأخف من الهواء. وقد عمد القرويون الذين أصابهم الذعر من هذا التحليق إلى تحطيم المنطاد عند عودته إلى الأرض. لكن «شارل» اختط بعمله هذا نهجا لا يزال الباحثون، بعد مرور قرنين من الزمن، يعملون في إطاره. يتجلى هذا النهج في استخدام طاقة غاز الهدروجين، العنصر الأخف في الطبيعة، كوقود لوسائل النقل.

يعد إحراق الهدروجين أو استخدامه في **خلايا الوقود** fuel cells التي تشغّل محركات سيارات المستقبل، خيارا مغريا لأسباب عديدة. فهو يحضّر محليا من مجموعة كبيرة من خامات كيميائية ومن مصادر طاقة أخرى (مثل مصادر الطاقة المتجددة ومن مصادر نووية وكذلك من مصادر **الوقود الأحفوري** fossil fuel) وهو غاز نظيف وغير سام يمكن أن يشكّل مصدر طاقة للآلات المتعددة الأنواع، وعند احتراقه لا يطلق أي ملوثات بيئية، مثل غاز ثنائي أكسيد الكربون المكوّن الفعّال في غازات الدفيئة. وحين حمله في خلايا الوقود التي تشبه في تركيبها البطاريات، يؤمن الهدروجين، عند احتراقه بالأكسجين، الطاقة اللازمة لتشغيل محركات السيارات التي تعمل بالكهرباء، ناشرا الحرارة ومخلفا الماء فقط كمنتج ثانوي [انظر: «*نحو سيارات تعمل بالهدروجين*»، **العلوم**، العدد 9 (2005)، ص 16]. وقد يتعدى مردود وفعالية السيارات التي تعمل بخلايا الوقود ضعفي مردود السيارات العاملة حاليًا؛ كما قد يؤدي استخدام الهدروجين إلى تقديم المساعدة والعون لحل مسائل وأمور اجتماعية وبيئية مثل تلوث الهواء، وما يسببه من مخاطر على الصحة العامة وتغيرات المناخ العالمي والاعتماد على النفط المستورد.

ومع جميع هذه التوقعات الإيجابية فإن عقبات أساسية تعترض استخدام غاز الهدروجين كوقود للسيارات. إن الطاقة التي تحملها كمية ما منه (1 كغ مثلا) تزيد على ثلاثة أضعاف الطاقة التي تحملها الكمية ذاتها من الكازولين؛ لكن يتعذر علينا اليوم، بل يستحيل، حمل غاز الهدروجين وتخزينه في السيارات بالسهولة والإحكام اللذين يُحمل بهما الكازولين. ويعد أمر هذا الحمل والتخزين من أشد الأمور التقنية تعقيدا وأكثرها مدعاة للإثارة والتحدّي، إذ كيف يمكن أن نحمّل السيارة، بصورة آمنة ومحكمة، ما يكفي من غاز الهدروجين لتحقيق مستوى الأداء ولقطع المسافة المطلوبين. وليست مهمة الباحثين في هذا المجال يسيرة، إذ إن عليهم إيجاد الحلول **المُثلى** goldilocks التي تؤمن ضبط عمليات التخزين وأمانها، وتأمين الوسيلة التي تتيح حمل ما يكفي من الهدروجين لقطع المسافة الدنيا المقبولة في يومنا وهي 300 ميل في خزان وقود لا يشكل حجمه مصدر إزعاج لركاب السيارة ولمكان الأمتعة والحقائب فيها؛ وعليهم كذلك إيجاد الوسائل التي تتيح تحرر الوقود الغازي في درجات الحرارة الاعتيادية وانطلاقه بمعدلات تدفق تحقق للسيارات التسارع المطلوب على الطرق السريعة؛ كما تتيح إمكانية إعادة ملء الخزان في دقائق قليلة وبأسعار معقولة. علما بأن تقنيات تخزين وقود الهدروجين الغازي ما زالت حتى يومنا هذا قاصرة وبعيدة جدا عن تحقيق هذه الأهداف.

لذلك يبذل الباحثون العاملون في صناعة السيارات، في كافة القطاعات الحكومية والأكاديمية ومراكز الأبحاث، في جميع أرجاء العالم جهودا كبيرة لتدارك هذا القصور والتغلب عليه. كما أن الاتفاقية التي وقعتها الوكالة الدولية للطاقة سنة 1977 حول استخدام الهدروجين تضم اليوم أكبر مجموعة دولية تعالج قضايا تخزين الهدروجين، حيث يعمل فيها أكثر من 35 باحثا في ثلاثة عشر بلدا؛ كما أن الشراكة العالمية لاقتصاد الهدروجين التي تشكلت في سنة 2003، تضم اليوم 17 حكومة التزمت كلها بدعم تقانات استخدام الهدروجين وخلايا الوقود. كما وضعت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة الأمريكية في سنة 2005 مشروعا وطنيا لتخزين الهدروجين يشارك فيه ثلاثة مراكز أبحاث متميزة والعديد من الصناعات والجامعات و**مختبرات** الأبحاث الفدرالية في مجالات أبحاث أساسية وتطبيقية. وقد قدّم هذا المشروع في عام 2006 أكثر من 30 مليون دولار لتمويل نحو 80 مشروع بحث.

عوائق البنى التحتية(**)

يعد الحجم الكبير للمواضيع الذي تطرحه مسألة خلايا الوقود الهدروجيني أحد العوائق التي تحول دون تبنّي هذه الخلايا على نطاق واسع في السيارات والشاحنات. فالناقلات العاملة في الولايات المتحدة وحدها تستهلك نحو 383 مليون كالون من الكازولين في اليوم (أي ما مقداره 140 بليون كالون في السنة)، وهو ما يشكل نحو ثلثي الاستهلاك القومي من النفط، الذي تستورد أكثر من نصفه من بلاد تقع في ما وراء البحار. لذلك تبدو الحاجة واضحة إلى استثمار مبالغ طائلة لتحويل صناعة السيارات في الولايات المتحدة إلى صناعة سيارات تعمل بخلايا الوقود، وكذلك لتحويل شبكة مصافي تكرير النفط ومحطات توزيع مشتقاته المنتشرة في جميع أرجاء البلاد، إلى محطات يتم فيها التعامل مع كميات كبيرة من الهدروجين. كما أن على السيارات التي تعمل بخلايا الوقود أن تكون قادرة على منافسة السيارات الحالية من حيث رخص ثمنها وطول عمرها وجودة أدائها. وعليها أيضا تلبية متطلبات الأمان اللازمة والتغلب على الموقف السلبي للجمهور تجاهها، الذي لم تغب عن ذهنه ذكرى مأساة **منطاد** airship هندنبرگ في سنة 1937، التي لا يزال الناس يعتقدون أن غاز الهدروجين مسؤول عنها، على الرغم من توفر العديد من الأدلة الموثوقة التي تؤكد أن مسؤولية اشتعال الحريق في المنطاد تقع على طبيعة سطحه الخارجي القابل للاشتعال.

وترجع صعوبة تخزين كمية كافية من الهدروجين في السيارة إلى طبيعة هذه المادة. فالهدروجين، في درجة الحرارة الاعتيادية

نظرة إجمالية/ تخزين الهدروجين(*)

- **من كُبرى العقبات التي تعترض تزويد سيارات المستقبل التي تعمل بخلايا الوقود، تحميلها كميةً من غاز الهدروجين تكفي لسيرها المسافة الدنيا التي يطلبها المستهلكون والمقدَّرة بنحو 300 ميل.**
- **غالبا ما يُخزَّن الهدروجين في درجات الحرارة الاعتيادية على شكل غاز شديد الانضغاط في خزانات تتحمل هذا الضغط العالي، إلا أنها لا تتسع لحمل ما يكفي منه؛ وبالمقابل فإن نظم تخزين الهدروجين السائل التي تحتاج إلى درجات حرارة شديدة الانخفاض، تعاني بدورها عقبات كبيرة.**
- **يجري حاليا تطوير تقانات تخزين بديلة، تحقق للهدروجين كثافات مرتفعة؛ إلا أن أيا منها لم يثبت جدارته حتى الآن في التغلب على العقبات القائمة.**

(*) Overview/ Hydrogen storage

(**) Infrastructural Hurdles



سوف تقدم محطات تزويد السيارات بغاز الهدروجين في المستقبل خدماتها باستخدام أحد نظم التخزين التي يجري تطويرها في الوقت الحاضر.

وتحت الضغط الجوي (الذي تبلغ قيمته 14.5 پاوند/بوصة مربعة[1]، "psi") يكون على شكل غاز تبلغ كثافته الطاقية 1/3000 من كثافة الگازولين الطاقية، وهذا يعني أن ملء خزان سيارة اعتيادية سعته 20 گالونا بهذا الغاز تحت ضغط جوي واحد، يجعلها تسير مسافة 300 قدم فقط؛ لذلك يعمل المهندسون، بغية تحسين أداء الهدروجين، على زيادة كثافته الطاقية في جميع أنظمة التخزين التي يعملون عليها.

يُعدُّ التوصل إلى جعل السيارات العاملة بوقود الهدروجين تقطع المسافة الدنيا المقدرة بنحو 300 ميل، أحد الأهداف العملياتية الأساسية التي تسعى الجهود المشتركة الحكومية والصناعية إلى بلوغها من خلال تطوير تقنيات متطورة لسيارات المستقبل. ويعتمد المهندسون لذلك طريقة مفيدة في حساباتهم مفادها أن گالونا واحدا من الگازولين، يعادل - من منظور طاقي - 1 كغ (2.2 پاوند من الهدروجين). وتحتاج السيارات العادية الحالية إلى نحو 20 گالونا من الگازولين لقطع مسافة 300 ميل. وهذا يعني أن سيارة نموذجية تعمل بخلايا الوقود سوف تحتاج إلى نحو 8 كغ من الهدروجين (بسبب مردوده العملياتي الأعلى) وقد تحتاج سيارات أخرى، تبعا لنوعها وقياسها، إلى أكثر أو أقل من ذلك. وبيّنت التجارب المجراة على نحو 60 نموذجا من خلايا الوقود التي يطورها العديد من الشركات المصنّعة للسيارات أن المسافة التي تقطعها سيارات الخلايا تراوح ما بين 100 و 190 ميلا.

وإذ يَجِدُّ السعي نحو الوصول إلى هدف عملي قد يمكن بلوغه في عام 2010 (حيث تتوقع بعض الشركات رؤية أول سيارات تعمل بخلايا الوقود تسير على الطرقات)، يقارن الباحثون أداء تقانات تخزين مختلفة تسعى إلى حَمْل «علامة bench mark 6% وزنا». وهو ما يعني نظام تخزين يحوي 6% من وزنه هدروجينا، بحيث يمكن تخزين 6 كغ من الهدروجين في نظام تخزين يزن 100كغ، وهو قياس ملائم للسيارات. وعلى الرغم من صغر ما تبدو عليه هذه النسبة فإن الوصول إليها أمر عسير جدا، إذ إن أفضل ما يمكن تحقيقه اليوم، باستخدام خزانات تعمل تحت ضغوط منخفضة نسبيا، لا يصل إلى 2%. كما أن تصنيع نظم تخزين تقارب في حجمها حجم خزان الوقود في سيارة اعتيادية تعمل بالگازولين، قد يكون أكثر صعوبة، لأن جزءا كبيرا من الحيز المخصص له سوف يُشغل بالخزان والصمامات والأنابيب والمنظِّمات والمحسّات وتدابير العزل الحراري وأمور أخرى يتطلبها حمل 6 كغ من غاز الهدروجين. وأخيرا فإن على نظام التخزين أن يكون قادرا على إطلاق الهدروجين بمعدل يكفي ليكون أداء مجموع خلية الوقود والمحرك الكهربائي قادرا على تأمين الطاقة والتسارع اللذين يتوقعهما السائق.

تخزين الهدروجين(*)

يجري تخزين الهدروجين اليوم في معظم نماذج السيارات العاملة بخلايا الوقود، التي يبلغ عددها بضع مئات، في أسطوانات تتحمل ضغوطا مرتفعة كتلك المستخدمة للغطس تحت الماء. وقد سمح التطور التقني الذي لحق بصناعة الخيوط الجراحية وبصناعة ألياف الكربون، بصنع خزانات شديدة المتانة وخفيفة الوزن يمكن حمل الهدروجين فيها تحت ضغط يراوح بين 5000 و 10 000 پاوند/بوصة مربعة "psi" (350 إلى 500 ضغط جوي) *(انظر المؤطر في الصفحة 22)*. إلا أن زيادة الضغط المطبق على الخزان لا تعني بالضرورة زيادة كثافة الهدروجين فيه على نحو يتناسب وتلك الزيادة؛ فأفضل كثافة طاقة تم تحقيقها في خزانات بلغت قيمة الضغط المطبق عليها 10 000 پاوند/بوصة مربعة (وهي ما يقابل تركيزا للهدروجين مقداره 39 غرام/لتر) تبلغ نحو 15% من طاقة الگازولين الذي يحمله الحجم ذاته. وتحمل خزانات الضغط العالي حاليا نحو 3.5% إلى 4.5 من وزنها هدروجينا. وقد صنعت شركة فورد مؤخرا نموذج سيارة رياضية تعمل بمحرك **هجين**[2] hybrid يتم فيه تخزين 4.5 كغ من وقود الهدروجين في خزان تحت ضغط مقداره 5000 پاوند/بوصة مربعة. وتبلغ المسافة العظمى التي تقطعها السيارة بهذا الوقود 200 ميل.

تتقبل وسائط النقل الكبيرة، مثل الباصات والشاحنات وسواها لكبر حجمها، خزانات الضغط العالي التي يتم فيها تخزين كميات كافية من الهدروجين، في حين لا تستطيع سيارات الركاب حمل مثل هذه الخزانات؛ كما أن تكلفة هذه الأخيرة تزيد بأكثر من عشرة أضعاف على تكلفة الخزانات المستخدمة حاليا في السيارات.

يمكن تحسين كثافة الهدروجين الطاقية بتخزينه مميّعا، حيث يتم احتواء أكبر قدر منه في الحجم المحدد لأي خيار محتمل. والهدروجين

(*) Containing Hydrogen

(1) رطل إنكليزي لكل بوصة مربعة.

(2) وهو محرك يعمل بالگازولين كما يعمل بخلايا الوقود.

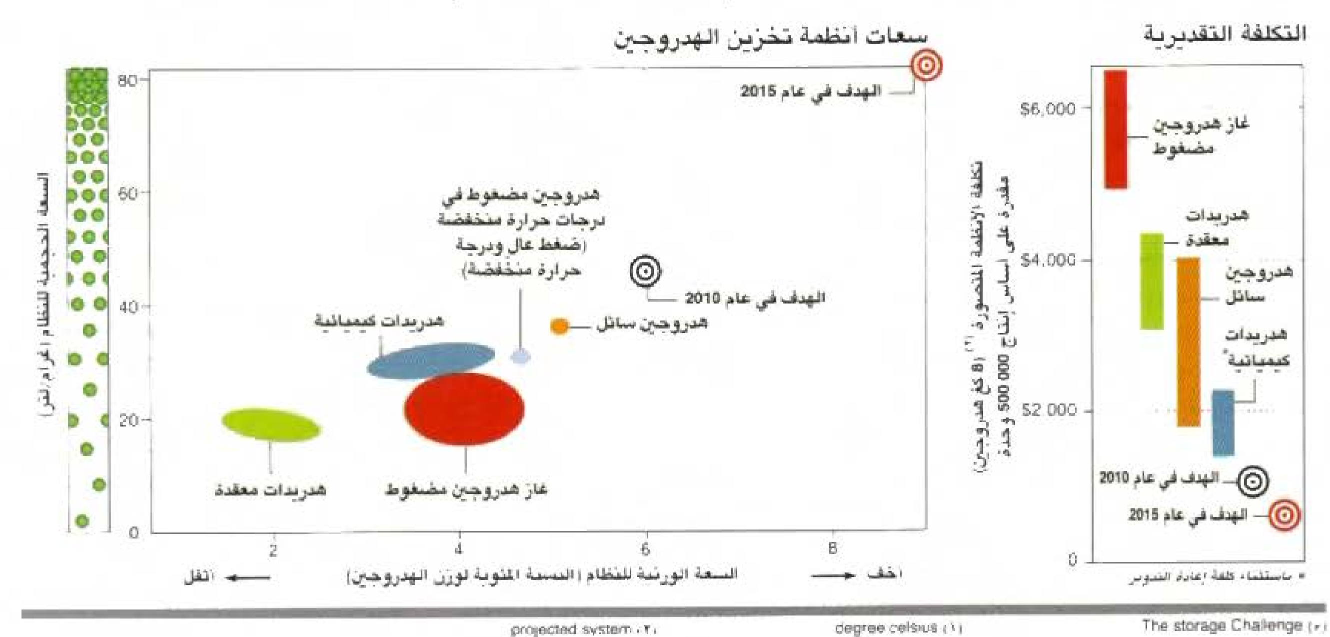


مثل أي غاز آخر، يتكاثف عند تبريده في درجة حرارة شديدة الانخفاض متحولا إلى الحالة السائلة: ويجري ذلك في درجة الحرارة -C253°(١) وتحت الضغط الجوي العادي. وتبلغ كثافة الهدروجين السائل 71 غرام/لتر، وهو ما يعادل 30% من كثافة الگازولين الطاقية. أما كثافة الهدروجين الوزنية التي يمكن تحقيقها في نظم التخزين فتتوقف على طبيعة تجهيزات الاحتواء والعزل فيها (*انظر المؤطر في الصفحة 23*).

إلا أن هناك عقبات كثيرة أمام استخدام الهدروجين المميّع. أولاها أن درجة غليانه الشديدة الانخفاض تقتضي تأمين تجهيزات تبريد شديدة الفعالية واتخاذ إجراءات احتياطية لضمان تدبره. كما يجب عزل خزاناته بصورة محكمة ومتقنة. وأخيرا فإن هذا التمييع يحتاج إلى

التحدي أمام عمليات التخزين(٣)

يجب أن يحمل نظام تخزين وقود الهدروجين ما يكفي منه لجعل السيارة تسير مسافة 300 ميل على الأقل؛ ويجب أيضا أن يكون مدمّجا، خفيف الوزن، يسهل تركيبه على السيارة. ويتطلع الباحثون إلى التوصل في سنة 2010 إلى نظام تخزين يحوي 6% من وزنه هدروجينا، ويحمل 45 غراما من الهدروجين في اللتر. قد يلبي هذا النظام (*الممثل بالهدف الدائري في الشكل الأيسر*) حاجة الجيل الأول من السيارات العاملة بخلايا الوقود. علما بأن أيا من الخيارات المتاحة في الوقت الحاضر لا يسمح ببلوغ هذا الهدف. وسوف تكون هناك حاجة في عام 2015 لتحقيق أداء أفضل، إلى تلبية متطلبات الأعداد المتزايدة من أنماط السيارات المتوفرة حينها. تأخذ القيم المدونة أدناه بالاعتبار التجهيزات اللازمة لتشغيل كل واحد من الأنظمة المختلفة: فالكثافة الحجمية للهدروجين السائل، مأخوذا لوحده، تبلغ 71 غرام/لتر، وهي تنخفض إلى نحو 40غرام/لتر عند أخذ الخزان وملحقاته بالاعتبار. ولا تظهر على الشكل البيانات الخاصة بالمواد التي تمتز الهدروجين (*انظر المؤطر في الصفحة 25*) التي ما زالت في مراحل مبكرة من تطويرها. ولا تتوفر أي بيانات عن سعتها أو عن تكلفتها.

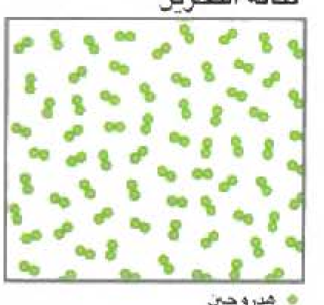


(٣) The storage Challenge (١) degree celsius (٢) projected system

هدروجين مضغوط(*)

أسطوانات متينة وخفيفة الوزن، تتحمل ضغوطا عالية، مثل أسطوانات الغواصين. يعبأ فيها الغاز المضغوط تحت ضغط يراوح بين 5000 و 10 000 باوند/ بوصة مربعة (psi).

كثافة التخزين






الإيجابيات	السلبيات	الوضع الحالي
خفيفة الوزن	كبيرة الحجم، تحتاج إلى انضغاط تحت ضغط عال وإلى إعادة تعبئة	متوفرة

طاقة تزيد على ما تتطلبه عملية انضغاط الغاز تحت ضغط مرتفع. تؤدي هذه المتطلبات إلى ارتفاع سعر وقود الهدروجين السائل، وإلى تدنّي مردود الطاقة الإجمالي لعملية **التبريد الشديد (القرّية)** cryocooling.

ومع ذلك فقد عمدت إحدى شركات تصنيع السيارات، وهي الشركة BMW، إلى تبنّي هذه الطريقة؛ وهي تخطط لصنع سيارة خلال هذا العام، أطلقت عليها اسم «هدروجين 7»، بمحرك احتراق داخلي يعمل إما على الكازولين (لمسافة 300 ميل)، أو على الهدروجين السائل (لمسافة 125 ميلا). وسوف تباع هذه السيارة على نطاق محدود ولزبائن مختارين في الولايات المتحدة وفي بلدان أخرى تتوفر فيها محطات التزود بوقود الهدروجين.

الالتزاز (الاندماج) الكيميائي(**)

قد يستفيد الباحثون اليوم من كيمياء عنصر الهدروجين في سعيهم إلى إيجاد طرق تتيح لهم زيادة الكثافة الطاقية لوقوده. فجزيئاته، في حالته النقية وفي طوريه الغازي والسائل، تتشكل من ذرتين مرتبطتين إحداهما بالأخرى؛ إلا أنه يمكن ربط هذه الذرات كيميائيا بذرات بعض العناصر الأخرى على نحو تكون فيه أقرب، بعضها من بعض، ممّا في الهدروجين السائل. وتسعى أبحاث تخزين الهدروجين في الوقت الحاضر إلى إيجاد مواد يمكنها تحقيق هذا الغرض.

ويركز بعض الباحثين جهودهم على صنف من بعض المواد المعروفة باسم «**هدريدات الفلزات** metal hydrides العكوسة»، تم اكتشافها بمحض المصادفة في مختبرات شركة فيليبس بهولندا سنة 1969، حين لوحظ أن سبيكة مصنوعة من فلزّي الساماريوم والكوبالت samarium-cobalt تمتص غاز الهدروجين عند وضعها في جو مضغوط منه، كما يمتص الإسفنج الماء؛ وعند إبعاد هذا الضغط المرتفع يتحرر الهدروجين من السبيكة، وهذا يدل على أن له تأثير امتصاص عكوسا.

وما لبثت أبحاث مكثفة أخرى أن لحقت بخطى هذا الاكتشاف، فكان <د. رايلي> [في مختبر بروك هافن الوطني] و<ر. ساندروك> [في مركز إنكو للأبحاث والتطوير بولاية نيويورك] رائدين في تطوير سبائك من هدريدات ذات قدرة ممتازة على امتصاص الهدروجين؛ وكان عملهم المبكر هذا الأساس الذي قامت عليه صناعة بطاريات هدريدات النيكل الواسعة الانتشار اليوم. والتي بلغت كثافة الهدروجين فيها قيما عالية جدا تزيد بنحو 150% على ما هي في الهدروجين السائل، وحيث تتقارب ذرات الهدروجين فيما بينها إلى حد كبير بسبب حشرها بين ذرات الفلز في **شبيكته البلورية** crystal lattice [*انظر المؤطر العلوي في الصفحة 24*].

تمتلك هدريدات الفلزات العديدَ من الخصائص التي تجعلها تلبّي بصورة جيدة متطلبات الاستخدام في السيارات، فهي تؤمن كثافة هدروجينية أعلى مما يؤمنه الهدروجين السائل وتحت ضغوط منخفضة نسبيا تراوح بين 10 و 100 ضغط جوي؛ كما أنها ثابتة بطبيعتها بحيث لا يحتاج حفظها وتخزينها إلى بذل أي طاقة إضافية، مع حاجتها إلى طاقة حرارية لإطلاق الغاز الذي تختزنه. أما **نقطة ضعفها**(1)، فتكمن في كبر كتلتها، حيث يعد وزنها عائقا أمام تخزينها في السيارات. وقد توصل الباحثون في مجال الهدريدات الفلزية في الوقت الحاضر إلى تحقيق سعة هدروجينية فيها حدّها الأقصى 2% من وزنها الكلي، وهذا يعني الحاجة إلى نظام تخزين يزن 1000 باوند (ويسمح للعربة بقطع مسافة 300 ميل)، وهو رقم كبير جدا بالنسبة إلى السيارات العاملة في الوقت الحاضر والتي تزن نحو 3000 باوند.

تركز دراسات هدريدات الفلزات في الوقت الحاضر على مواد تحوي بطبيعتها نسبة مرتفعة من الهدروجين، حيث يصار إلى تعديلها على نحو يتيح لها تلبية متطلبات أنظمة تخزين هدروجين تعمل في درجات حرارة قريبة من الدرجة 100C°، وتحت ضغط يراوح بين 10 و 100 **جو**(2)، ويجعلها تطلق هدروجينها بسرعات تحقق التسارع الذي تتطلبه السيارات السريعة. هذا ولأن الكثير من هذه المواد العالية المحتوى من الهدروجين ثابتة إلى حد بعيد، فهي تحتاج لتسخينها إلى درجات حرارة مرتفعة نسبيا لإطلاق هدروجينها. فهدريد المكنيزيوم مثلا، الذي يحوي 7.6% من وزنه هدروجينا، يطلق غازه عند نحو الدرجة 300C°. وإذا أردنا الاستفادة من الطاقة الحرارية الضائعة التي تحملها عوادم خلايا الوقود، التي تبلغ درجة حرارتها نحو 80C°، لإطلاق عملية تحرير الهدروجين من هدريد المكنيزيوم، وجب السعي إلى خفض درجة حرارة الإطلاق

(*) COMPRESSED HYDROGEN
(1) Achilles' heel
(**) Chemical Compaction
(2) atmospheres

الهدريدات القليلة الثبات(*)

يسعى الكيميائيان <J. J. فاجو> و<L. G. أولسن> [من مختبرات HRL في كاليفورنيا]، كما يسعى باحثون غيرهم في مواقع أخرى، إلى استكشاف خيارات أو مقاربات ذكية للتغلب على الصعوبة التي يسببها ارتفاع درجة حرارة الإطلاق: وتجمع هدريداتهم «القليلة الثبات» مواد عدة تعمل على تبديل مسار التفاعل، بحيث تطلق المركبات الناتجة ما تحويه من هدروجين في درجات حرارة أكثر انخفاضا.

والهدريدات القليلة الثبات تنتمي إلى صنف من المواد المسماة الهدريدات المعقدة، والتي تحوي غاز الهدروجين في تركيبها. وقد ظنّ الكيميائيون لأمد طويل أن العديد من هذه المواد لا يصلح للاستخدام وقودا للسيارات. فهي مركبات غير عكوسة، إذ تحتاج بعد تفككها وإطلاقها ما تحمله من هدروجين، إلى معالجة لاحقة تعيدها إلى حالتها الأولية المهدرجة. وقد أدهش الكيميائيان <B. بوكدانوفيتش> و<M. شويكاردي> [من معهد ماكس پلانك لأبحاث الفحم في ألمانيا] عام 1996، حين قدّما الدليل على أن معقد هدريد ألانات الصوديوم يصبح عكوسا عندما يضاف إليه مقدار يسير من فلز التيتانيوم. وقد أطلق هذا العمل موجة من النشاط خلال العقد الماضي: فتم في مختبرات HRL تحضير معقد قليل الثبات من بوروهدريد الليثيوم وهدريد المگنيزيوم يحمل، بصورة عكوس، 9% من وزنه هدروجينا ويعمل في درجة الحرارة 200°C. واعتُبر هذا التحسين أمرا جديرا بالملاحظة مع أن درجة حرارة عمل المعقد ظلت مرتفعة على نحو ما، وظلت سرعة انطلاق الهدروجين منه بطيئة جدا، وهذا يحول دون استخدامه وقودا للسيارات. ومع ذلك فقد كان عملا واعدا.

وعلى الرغم من القيود التي تحدّ من استخدام هدريدات الفلزات في الوقت الحاضر، فإن العديد من الشركات المصنعة للسيارات يُرى فيها الخيار الأفضل الذي يعمل تحت ضغط منخفض والأكثر قابلية للحياة على المدى القريب والمدى المتوسط. ففي شركتي تويوتا وهوندا، يخطط المهندسون المصمّمون لمقاربة هجينة في نظام يعمل فيه هدريد فلزي صلب تحت ضغط معتدل نسبيا (أخفض على نحو ملحوظ من 10 000 psi)، وقادر كما يتوقعون، على قطع مسافة تزيد على 300 ميل. كما يدعم فريق من خبراء التخزين في شركة جنرال موتورز، من بينهم <S. جورجنسن> أبحاثا تجرى في بلدان عدة (من بينها روسيا وكندا وسنگافورة) عن طيف واسع من نظم هدريدات الفلزات. وتتعاون الشركة مع مختبرات ساندِيا الوطنية في برنامج يمتد على أربع سنوات، بمخصصات تبلغ 10 ملايين دولار، لصنع نموذج نظام يعمل بمعقد هدريد فلزي.

حوامل الهدروجين(**)

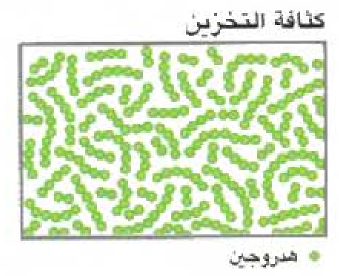
وهناك خيارات مقاربات أخرى تتمتع بميزة إمكانية عملها في السيارات بصورة جيدة، لكنها تواجه، بدورها، صعوبة تبدو في مرحلة التزويد بالوقود. ذلك أن هذه الهدريدات تحتاج إلى معالجات صناعية لإعادة تكوين مادتها المستهلكة، وهي خطوة ينبغي أن تتم خارج العربة: إذ ما إن ينطلق الهدروجين المختزن في النظام المعتمد، حتى يُسلَّم ما تبقى منه إلى محطة تزويد بالوقود ليصار إلى معالجته في وحدة معالجة كيميائية (*انظر المؤطر السفلي في الصفحة 24*).

وقد درس فريق من الباحثين اليابانيين هذه المقاربة منذ أكثر من 20 سنة باستخدام نظام مكون من مادتي الديكالين والنفتالين. يتحول الديكالين السائل (وصيغته $C_{10}H_{18}$) عند تسخينه إلى مركب كيميائي ذي رائحة واخزة، هو النفتالين (وصيغته $C_{10}H_{11}$)، حيث تتغير طبيعة الروابط الكيميائية في جزيء الديكالين، وتنطلق من هذا التحول خمسة جزيئات من غاز الهدروجين. ومع تعريض النفتالين إلى جو من غاز الهدروجين تحت ضغط معتدل، ينعكس هذا الإجراء، فيمتص النفتالينُ الهدروجينَ ويتحول ثانية إلى ديكالين decalin. (يبلغ وزن الهدروجين الممتص 6.2% من وزن النفتالين). ويعمل الباحثان الكيميائيان <A. كوبر> و<G. بيز> [من شركة منتجات الهواء والكيميائيات في ولاية پنسلڤانيا] على تقنيات مماثلة مستخدمين مركبات عضوية سائلة (ذات أساس هدروكربوني). كما يعمل **باحثون آخرون**(1) على مواد سائلة جديدة تحمل الهدروجين، مثل **البورانات الأمينية** aminoboranes القادرة على تخزين كميات كبيرة من الهدروجين وإطلاقه في درجات حرارة معتدلة.

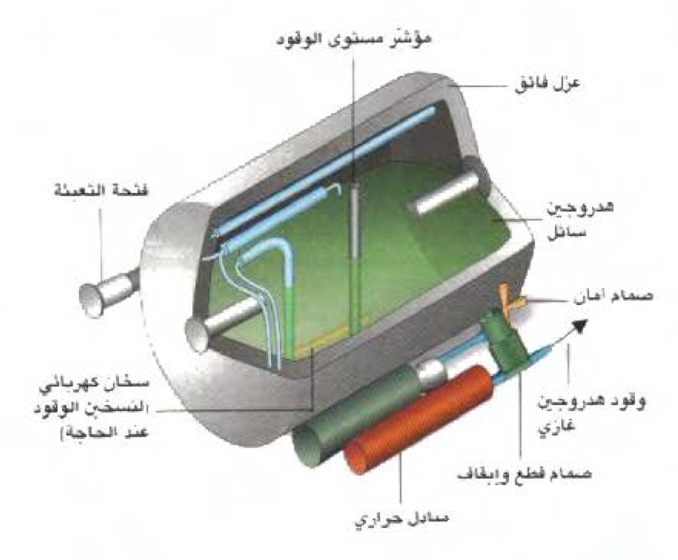
الهدروجين السائل(***)

يتكاثف الهدروجين ويميع عند تبريده إلى الدرجة -253°C، وتتطلب المحافظة على درجة الحرارة هذه الكثير من تجهيزات العزل ومن تجهيزات مساعدة أخرى.

كثافة التخزين



• هدروجين



الإيجابيات	السلبيات	الوضع الحالي
خفيف الوزن وصغير الحجم.	فقد مستمر للوقود بسبب التسخين - الحاجة إلى طاقة لتمييع الهدروجين.	متوفر

Destabilized Hydrogen (*)

Hydrides Carriers (**)

LIQUID HYDROGEN (***)

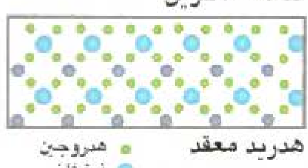
(1) من بينهم <S. توماس أوتري> وفريقه [في المختبر الوطني لشمال غرب الباسيفيك] وأستاذ الكيمياء <L. G. سبدون> [في جامعة پنسلڤانيا]

هدريدات معقدة(*)

يشكل الهيدروجين، بارتباطه بفلزات وبمواد أخرى، هدريدات فلزية (كيميائية) (في أسفل الصفحة)، وهدريدات معقدة (في يسار الشكل) ويتحرر الوقود الهيدروجيني، عند الحاجة إليه، بتسخين هذه المعقدات

كثافة التخزين







الإيجابيات	السلبيات	الوضع الحالي
صغير الحجم، يمكن إعادة شحنه على السيارة، كما يمكنه العمل تحت ضغوط منخفضة أو متوسطة.	مرتفع الوزن، يعمل في درجات حرارة مرتفعة، ويتدفق الوقود منه بصورة غير كافية.	قيد التطوير.





هدريد الصوديوم والألمنيوم (مثال عن هدريد معقد)

تصميم مواد جديدة(**)

وتتوجه مقاربة أخرى لموضوع اختزان الهدروجين نحو مواد خفيفة الوزن وذات سطح نوعي كبير جدا، يمكن لجزيئات الهدروجين أن تلتصق بها (أو تُمتزّ عليها) (*انظر المؤطر في الصفحة المقابلة*) وكما يتوقع المرء فإن كمية الهدروجين التي يمكن أن ترتبط بسطح مثل هذه المواد تتناسب مع مساحة هذا السطح وقد أدت التطورات الحديثة في مجال **الهندسة النانوية**[1] إلى تصنيع حشد من مواد ذات سطح نوعي عال جدا تبلغ قيمته في بعضها 5000م² للغرام الواحد. وهذا يعني إمكانية تغطية مساحة تبلغ ثلاثة أفدنة (نحو 12 000م²) بملء ملعقة صغيرة من مسحوق هذه المادة وتستدعي الاهتمام من بين هذه المواد، تلك المصنّعة من عنصر الكربون، وذلك لخفة وزنها وانخفاض تكلفتها وإمكانية تشكيل العديد من البنى النانوية القياس منها: من أنابيب نانوية إلى أنابيب على شكل أبواق مستدقة إلى **الفوليرينات** fullerenes[2] ذات الجزيئات الكروية الشكل، إلى الهلامات الهوائية (وهي أجسام صلبة ذات مسامية فائقة)

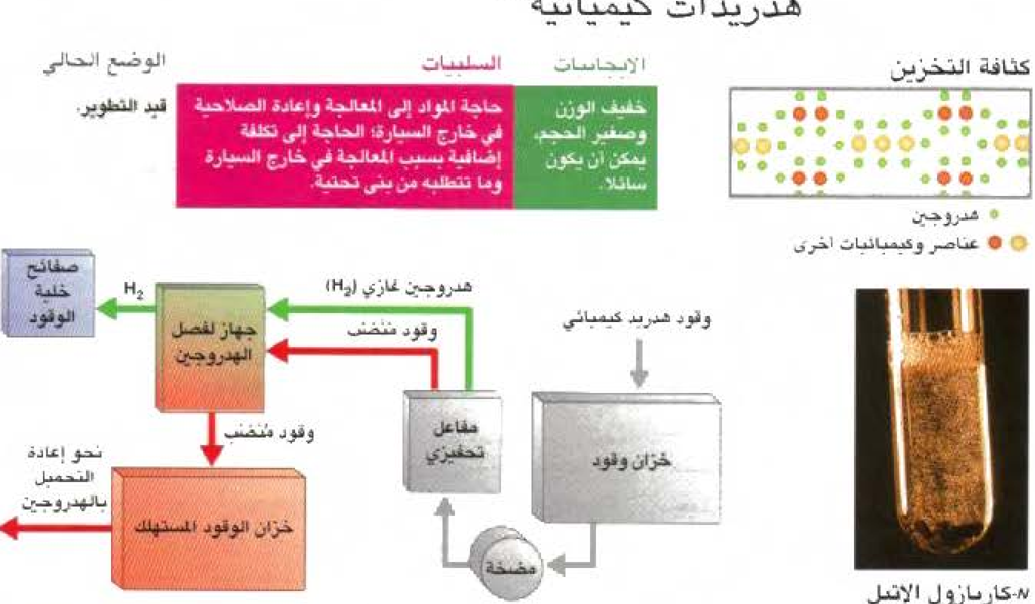
هدريدات كيميائية(***)

تحتوي هذه المركبات التي قد تكون سائلة أو صلبة على الهدروجين، ويطلق الوقود الغازي منها عند تسخينها وتعريضها لحفّاز (*الصورة اليسرى*) ويبين المخطط (في أقصى *اليسار*) كيفية معالجة الهدريد الكيميائي في خارج السيارة وإعادة تحميله بالهدروجين بعد استخدامه

كثافة التخزين

هدروجين
عناصر وكيميائيات أخرى

N-كاربازول الإتيل



الإيجابيات	السلبيات	الوضع الحالي
خفيف الوزن وصغير الحجم، يمكن أن يكون سائلا.	حاجة المواد إلى المعالجة وإعادة الصلاحية في خارج السيارة؛ الحاجة إلى تكلفة إضافية بسبب المعالجة في خارج السيارة وما تتطلبه من بنى تحتية	قيد التطوير.

COMPLEX HYDRIDES (*)
Designer Materials (**)
CEMICAL HYDRIDES (***)

(1) أي بمقياس النانو، وهو ما يعادل 10^{-9} من وحدة القياس المعتمدة: فالنانومتر يعادل 10^{-9} متر

(2) الفوليرين هو الشكل المتغاير الرابع لعنصر الكربون في الطبيعة وتتكون بنيته من حلقات خماسية وحلقات سداسية متجاورة مترتبة على شكل كرة قدم اكتشفه في سنة 1985 المهندس المعماري «فولّرين بوكمينستر»، ومنه أخذ اسمه أما الأشكال الثلاثة الأخرى لعنصر الكربون فهي الكربون عديم الشكل والماس والگرافيت (التحرير)

مواد تمتز الهدروجين(*)

تمتـز (تَعْلَق) ذرات الهـدروجين على سطح مواد تصمم على نحو خاص لذلك.

كثافة التخزين



● هدروجين
● مواد كيميائية ذات أساس كربوني أو سواها من البنى النانوية.

أنابيب نانوية من الكربون (أعلى اليسار) يمكنها حمل الهدروجين عليها وتخزينه حتى تحين الحاجة إليه (أسفل اليسار). يصمم الكيميائيون بنى حزيئية فلزية-عضوية تستطيع جزيئات الهدروجين أن تعلق عليها (أسفل الشكل).

هدروجين

حجم داخلي

أنابيب نانوية من الكربون

بنية فلزية-عضوية

الإيجابيات	السلبيات	الوضع الحالي
خفيف الوزن - يعمل على نحو عكوس في السيارة، يمكن أن يعمل في درجة حرارة الغرفة.	كبير الحجم - قد يتطلب عمله درجات حرارة منخفضة.	في مرحلة مبكرة من البحث والتطوير.

ومنها أيضا الكربون المنشَّط وهو مادة رخيصة الثمن، يمكنها اختزان حتى 5% من وزنها هدروجينا.

ومع ما لهذه البنى الكربونية ذات السطح النوعي المرتفع جدا من مزايا فإن أمامها جميعا عائقا مشتركا يحدّ من إمكانية استخدامها؛ فارتباط جزيئات الهدروجين بذراتها ارتباط واهٍ يقتضي معه حفظها في درجات حرارة شديدة الانخفاض وقريبة من درجة حرارة النتروجين السائل وهي -196°C. لذلك يوجه الباحثون سعيهم فيها - على خلاف الباحثين في مجال الهدريدات الفلزية الذين يسعون إلى خفض طاقة ارتباط الهدروجين بها - لاستكشاف وسائل ترفع من قيمة طاقة الارتباط هذه، وذلك بتعديل طبيعة سطوحها أو بإضافة مواد جديدة إليها تبدل من خصائصها؛ ويستخدم هؤلاء الباحثون نماذج نظرية لبنى كربونية بغية التوصل إلى تحديد الأنظمة الواعدة الأفضل تمهيدا لدراسات لاحقة تُجرى عليها.

وعدا هذه المقاربات التي تتوجه نحو مواد ذات أساس كربوني، فإن هناك مقاربة مغرية أخرى لهندسة نانوية تُوجه صوب مجموعة من مواد تعرف بالمواد العضوية-الفلزية، كان قد اكتشفها منذ سنوات قليلة <عمر ياغي> [أستاذ الكيمياء في جامعة ميتشيكان بان هاربور، وهو حاليا في جامعة كاليفورنيا بلوس انجلوس]. ويشار إلى هذه المواد بالرمز MOF's، وهو ما يعني **البنى العضوية الفلزية** metal-organic framework's. وقد بين <ياغي> والعاملون معه أنه يمكن تصنيع هذا الصنف الجديد من المواد البلورية ذات السطوح العالية المسامية، بربط مركبات لاعضوية ببعضها بواسطة **دعامات** struts من مركبات عضوية (*انظر المؤطر في هذه الصفحة*). ولهذه المركبات التركيبية بنى جميلة المظهر، كما يمكن التحكم في خصائصها الفيزيائية على نحو تغدو معه قادرة على تحقيق وظائف ومهام مرغوبة. كما أن لهذه البنى اللامتجانسة سطوحا نوعية كبيرة جدا تبلغ 5500 م²/غرام، ويمكن تكييفها بإقامة مواقع كيميائية عليها تحقق ارتباطا أفضل لجزيئات الهدروجين. وقد تمكن الباحثون حتى الوقت الحاضر من تصنيع بنى عضوية فلزية يمكنها حمل 7% من وزنها هدروجينا في الدرجة -196°C وهم يتابعون البحث لدعم هذا الأداء وتحسينه.

وعلى الرغم من أن التقدم الذي تشهده حاليا طرق تخزين الهدروجين يعد مشجعا، فإن الوصول إلى المقاربة الأمثل لحل مسألة التخزين أمر يحتاج إلى الوقت ويتطلب الصبر والأناة والأبحاث الخلاقة والجهود التطويرية. لقد ظل الأمل - والتحدي - باستخدام الهدروجين في وسائط الانتقال، على حاله قرونا طويلة لم تلحقه فيها أية تغيرات أساسية. لقد حمل <جاك شارل> الهدروجين المعبأ في حاوية خفيفة الوزن، والذي مكّنه من التنقل في الأجواء في منطاده في العقود الأخيرة من القرن الثامن عشر. وسوف يتيح إيجاد حاوية تحمل الهدروجين على متن السيارات إمكانية التنقل في أرجاء العالم في العقود القادمة من القرن الحادي والعشرين دون خشية من إفساد الجو وتلويث البيئة. ■

(*) HYDROGEN ADSORBENTS

المؤلفون

Sunita Satypal - John Petrovice - George Thomas

يعملون جميعا في برنامج وزارة الطاقة بالولايات المتحدة الأمريكية في مجال الأبحاث التطبيقية والتطويرية لتقانة تخزين الهدروجين. شغل <ساتيابال> عدة مناصب في الجامعات وفي الصناعة، وهو الآن رئيس الفريق العامل في وزارة الطاقة في مجال الأبحاث التطبيقية والتطويرية لتقانة تخزين الهدروجين. أما <بيتروفيتش> [وهو متقاعد حاليا]، فزميل في المختبر الوطني بلوس ألاموس ومستشار في وزارة الطاقة وعضو في كل من جمعية الخزف الأمريكية والجمعية الأمريكية للمواد. أما <توماس> [وهو الآن مستشار لدى وزارة الطاقة] فذو خبرة تمتد لأكثر من ثلاثين سنة في دراسة تأثيرات الهدروجين في الفلزات بمختبرات ساندیا الوطنية. إن الآراء الواردة في هذه المقالة تعبر عن وجهة نظر المؤلفين ولا تعبر عن آراء وزارة الطاقة في الولايات المتحدة الأمريكية.

مراجع للاستزادة

The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs. National Research Council and National Academy of Engineering. National Academies Press, 2004. Available at **www.nap.edu/catalog.php?record_id=10922**

Hydrogen Program: 2006 Annual Merit Review Proceedings. U.S. Department of Energy. Available at **www.hydrogen.energy.gov/annual_review06_proceedings.html**

United States Council for Automotive Research: **www.uscar.org**

International Energy Agency's Hydrogen Implementing Agreement: **www.ieahia.org**

International Partnership for the Hydrogen Economy: **www.iphe.net**

Scientific American, April 2007

هل هناك شفاءٌ من الكَلَب ؟[*]

إن بقاء مراهقةٍ على قيد الحياة بعد إصابتها بالكَلَب ربما يشير إلى سبيلٍ لمعالجة هذا المرض المروّع.

<R .E. ويلوكباي جونير>

إن الكَلَب واحد من أكثر الأمراض قدما وترويعا للناس. فهو يهاجم الدماغ مسببا تهيجا وذعرا واختلاجات عنيفة. ويعاني الضحايا تقلصات مؤلمة في الحلق عند محاولتهم الشرب أو الأكل. ويعقب ذلك شلل، إلا أن البشر المصابين بالكَلَب يبقون يقظين بصورة متقطعة وحتى قرب حلول الموت ويكون بإمكانهم التعبير عن مخاوفهم ومعاناتهم لأسرهم وللقائمين على رعايتهم. ومع أن اللقاحات الخاصة بڤيروس الكَلَب تستطيع أن تمنع تطور المرض، إلا أن الأطباء، وحتى عهدٍ قريب، لم يكن لديهم أي أمل بالنسبة إلى المرضى الذين أخفقوا في الحصول على التمنيع باللقاح في أبكر فرصة بعد تعرضهم للعض من حيوان مصاب بالكَلَب. وبمجرد ظهور أعراض الكَلَب (نمطيا خلال شهرين من العضة) فإن الموت كان عادة محتوما في أقل من أسبوع.

ومع ذلك ففي عام 2004 كنت ضمن فريق من الأطباء في مستشفى الأطفال التابع لولاية ويسكونسن، وقد تمكنوا من إنقاذ فتاة عمرها 15 عاما من مثل هذا المصير. وبذلك صارت <جينا كيسي> [من ولاية ويسكونسن] أول ناجية غير محصنة من الكَلَب (كذلك هناك خمسة أشخاص آخرون تمّ تلقيحهم، لكن الكَلَب تطوّر لديهم على نحو ما ومع ذلك نجوا أيضا). لقد أثار علاجنا المبتكر، والمسمى بروتوكول ميلووكي، الجدل بين الأطباء الاختصاصيين، وادعى البعض أن شفاء <جينا> كان رمية من غير رام. ومع أن المحاولات القليلة لإعادة تطبيق المعالجة لم تنقذ حياةً أي مريض بالكَلَب غيرها، فبحماس، نأمل أننا نسير على الطريق الصحيح. فعلى أقل تقدير، بدأ الباحثون بإجراء دراسات على الحيوانات لتعيين أي من العناصر في هذا البروتوكول قد يساعد على هزيمة الكَلَب.

وقد يصبحُ الشفاء من الكَلَب هبة للعالم النامي، فالمرض نادر في الولايات المتحدة الأمريكية وأوروبا، لأن حملات برامج الصحة العامة قد قضت تقريبا على الڤيروس في الحيوانات الأليفة، مثل: الكلاب والقطط والماشية. ولا يموت إلا مريضان أو ثلاثة كل عام في الولايات المتحدة، وهذا يعني أن فرصة الشخص أن يصاب بالمرض هي نحو واحد لكل 100 مليون. (في الحقيقة إن المرض هو من الندرة في الولايات المتحدة إلى حد أنه لا يتمّ تعرفه في نصف عدد المرضى إلا بعد أن يموتوا). ولكن منظمة الصحة العالمية تقدّر أن الكَلَب يقتل 55 000 فرد سنويا في آسيا وإفريقيا وأمريكا اللاتينية، وأن معظم الضحايا يصابون بالعدوى نتيجة لعض الكلاب. وإذا تمكن الباحثون من تحليل بروتوكول ميلووكي كما يجب وتعرّفوا معالجة غير مكلفة قد تكون لها فوائد مماثلة فإن العلاج الناتج قد ينقذ آلاف الأرواح.

عضة خفاش[**]

إن الكَلَب هو ڤيروس رنوي RNA virus يحتوي على **الرنا** RNA، وهذا يعني أن له غشاءً خارجيا وأنه يستخدم حمض الريبونوكليك كمادته الجينية عوضا عن حمض الديزوكسي ريبونوكليك (**الدنا** DNA) الذي يستخدمه الإنسان وجميع أشكال الحياة الأخرى. إن هذا الميكروب[1] الذي يشبه الرصاصة يغزو خلايا الإنسان ويدفعها بعنف لإنتاج ڤيروسات

(*) A CURE FOR RABIES?
(**) A Bat Bite
(1) الكائن المجهري.

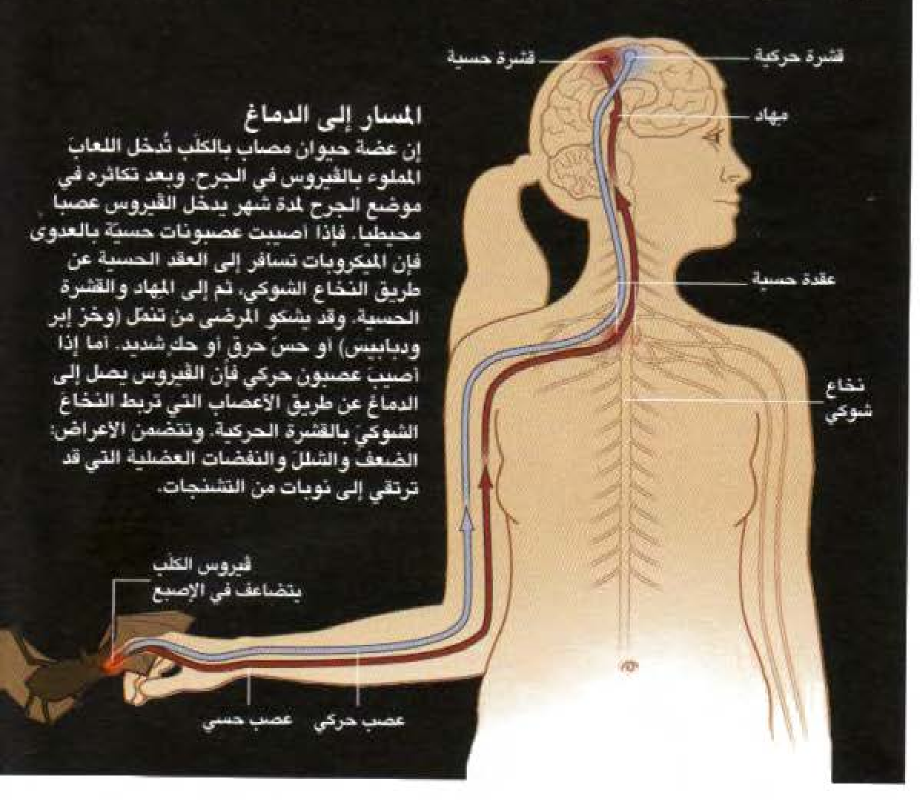


جديدة، ويُحدث ما يحدثه من تلف بصنع خمسة بروتينات. ولأنها شديدة التخصص بالنمو في خلايا الدماغ والأعصاب فإن فيروس الكَلَب نادرا ما يمكن العثور عليه في أي مكان آخر في الجسم. فبعد نقله عن طريق عضة حيوان مصاب بالكَلَب (والتي تُدخل اللعابَ المصاب بالعدوى في الجرح) يتضاعف الفيروس موضعيا في العضلات أو الجلد. ولأن الفيروس يكون موجودا بكمية ضئيلة جدا ولأنه لا ينتقل من خلال مجرى الدم أو العقد اللمفاوية، فإن الجهاز المناعي للجسم لا يكتشف هذه الميكروبات (الأحياء المجهرية) في هذه المرحلة. وتستمر فترة الحضانة الخالية من الأعراض نمطيا من أسبوعين إلى ثمانية أسابيع، إلا أنها قد تمتد لعدة سنوات. وفي نقطة معينة تصل الفيروسات إلى أحد الأعصاب، وعندها تكون اللعبة قد انتهت.

في أواخر القرن التاسع عشر اكتشف عالم الميكروبات «لويس باستور» أن حقن فيروس الكَلَب المقتول يحفِّز الجهازَ المناعي على إنتاج أضداد ضد هذا الميكروب. والأكثر من ذلك فقد تبين لـ«باستور» أن الوقت اللازم للجسم لإنتاج تلك الاستجابة المناعية أقصر من فترة حضانة المرض. وقد حقن فيروسات مقتولة مأخوذة من الأنخعة (الحبال) الشوكية للأرانب **المخموجة**[1]، في الأفراد الذين عضتهم كلاب مصابة، فبقوا أحياء باكتساب المناعة قبل ظهور أي أعراض عندهم. وقد يتطور الكَلَب في الفسحة ما بين التمنيع والاستجابة المناعية، لذلك يحقن الأطباءُ مرضاهم بأضداد خاصة بالكَلَب لتغطية تلك الفجوة الزمنية. هذا وتنظيف الجرح بطريقة ملائمة بالماء والصابون (الذي يقتل الفيروس بنزع غشائه) هو أمر مهم أيضا. والوقاية فيما بعد التعرض للإصابة (العناية بالجرح وخمس حقنات من لقاح مأمون جدا وجرعة واحدة من الأضداد antibody) لم تفشل أبدًا في الولايات المتحدة منذ إدخالها في عام 1975.

التفاقم المروّع للكَلَب[**]

تستطيع اللقاحات ضد الكَلَب أن تمنع المرض من التطور إذا أُعطيت سريعا بعد تعرض المريض للعض من حيوان مصاب بالكَلَب؛ ولكن المرض يصبح مميتا لهؤلاء الذين يفشلون في الحصول على اللقاح.



لقد بدأ صراع الفتاة «جينا» مع الكَلَب عندما اصطدم خفاش بنافذة داخلية في كنيستها في أثناء أحد الطقوس الدينية. وعندما التقطته من طرفي جناحيه لإطلاقه إلى الخارج، انطلق الخفاش بقوة نحو يد «جينا» اليسرى، وأصيبت في سبابتها بجرح قاطع بطول ربع بوصة (نحو 6 مليمترات). ولما كانت أسنان الخفاش قصيرة وحادة كالشفرة، فلا يحسّ الناس بالعضة عادة، وقد يكون من الصعب العثور على موضعها. لهذه الأسباب ينصح مسؤولو الصحة بإعطاء لقاح الكَلَب لكل من لامس خفاشا أو كان نائما في غرفة فيها خفاش (إلا إذا أمكن أسر الخفاش وتم اختباره للتأكد من خلوه من الكَلَب). وقد نظفت «جينا» الخدش لديها بماء الأكسجين (بيروكسيد الأكسجين) ولكنها لم تسعَ للحصول على التمنيع، ولو أنها فعلت ذلك لأتمّت دراستها الثانوية في الصف الثاني من دون اضطراب.

وبدلا من ذلك، تضاعف الفيروس في إصبع «جينا» نحو الشهر، ثم دخل في أحد الأعصاب وانتقل بسرعة نحو دماغها متحركا بسرعة نحو سنتيمتر واحد في الساعة. ولأن هذا الفيروس يستهدف الجهاز العصبي دون غيره (حيث لا تعمل أنواع عديدة من الخلايا المناعية) فإن الجسم لا يكتشف الفيروس إلا بعد أن يكون قد ارتشح بكثافة في الدماغ والنخاع الشوكي والمريض بالكَلَب يتطور لديه في النهاية شللٌ تام نتيجة خمج (عدوى) الأعصاب الحركية وفقدٌ لكل الإحساس نتيجة خمج الأعصاب الحسية. والآلية وراء هذا الفقد للنشاط

نظرة إجمالية/ أحجية داء الكَلَب[*]

- **في عام 2004 أنقذ الأطباء حياة فتاة مراهقة التقطت الكَلَب من عضة خفاش. وتضمن العلاج إحداث سبات (غيبوبة) وإعطاء عقاقير كافحت فيروس الكَلَب وصانت الدماغ.**
- **لا يعرف الباحثون لماذا نجحت المعالجة، ونجاحها لم يتمّ تكراره. ويحتاج الباحثون إلى أن يجربوا العلاج على الحيوانات المصابة بالكَلَب، ولكن الكليات البيطرية تعارض ذلك.**
- **إن بمقدور علاج للكَلَب، يمكن الاعتماد عليه وغير باهظ الثمن، أن ينقذ آلاف الأرواح في البلاد النامية، حيث لا يزال المرض شائعا.**

(*) Overview/ A Rabies Riddle
(**) THE TERRIBLE COURSE OF RABIES
(1) المصابة بالعدوى



تخريب الجسم
بمجرد دخول الڤيروس إلى القشرة فإنه ينتشر سريعا إلى الدماغ الشديد الترابط مبديا ميلا إلى المُخيخ (الذي ينسّق حركات الجسم) والحُصين (المتعلّق بالذاكرة القصيرة الأمد) والجهاز الحُوفي (الذي ينظّم الانفعالات). وتصبح الحيوانات المخموجة سريعة التهيج وقلقة وعدوانية، وقد تقوم بتشويه ذاتها. ولكي تكتمل دورة حياته، فإن ڤيروس الكَلَب يجب أن يشق طريقه إلى الغدد اللعابية والدمعية، ومن ثم يتابع نحو ضحاياه التالين. يهاجر الميكروب من الدماغ عبر أيّ عصب محيطي بما في ذلك الأعصاب المستقلّة التي تربط الدماغ بالأعضاء الحيوية والغدد اللعابية والدمعية. ويحدث الموت نتيجة لتوقف القلب أو السكتة الدماغية أو القصور التنفسي.

العصبي غير معروفة، كما أن الباحثين لا يفهمون تماما كيف يقتل الكَلَبُ مريضا. فقد يحدث الموت بطرق عدة: الصدمة أو توقف القلب أو الفشل التنفسي. وعلى ما يبدو فإن ڤيروس الكَلَب قد يدفع الدماغ إلى تخريب أعضائه الحيوية، وهذه الملاحظة هي التي ألهمتنا علاج الفتاة <جينا>.

لقد تطور عند <جينا> [الطالبة الموهوبة والنجمة في فريق مدرستها الثانوية للكرة الطائرة] مرضٌ شبيه بالأنفلونزا في الشهر 2004/10، بعد شهر من تعرضها لتلك العضة. وبعد ذلك عانت فَقْد الإحساس في يدها اليسرى وضعفا في ساقها اليسرى وازدواج الرؤية. أُدخلت المستشفى المحلي في عطلة نهاية الأسبوع. ثم صارت **نوامية** lethargic وحركتها غير متناسقة، وهذه الأعراض نمطية لالتهاب الدماغ (وهو أمر شائع في الممارسة الطبية، ويحدث لدى عدة آلاف من المرضى سنويا في الولايات المتحدة)، الذي تسببه أنواع مختلفة من الڤيروسات والبكتيرات، ولكنه قد يُستثار بواسطة استجابة مناعية تسلك مسلكا خفيا وتلهب الدماغ. ولأن تصوير دماغ <جينا> كان طبيعيا [لم يُبدِ أي سمة لالتهابٍ أو **سكتة دماغية** stroke]، خمّن أطباؤها أنها تعاني ذلك النوع من التهاب الدماغ نتيجة لما بعد الخمج أو نتيجة المناعة الذاتية. وبدا أنها قد تتطور نحو السبات وتحتاج إلى **التهوية الآلية**[1]، لذا حُوّلت إلى مستشفانا.

لقد أوشكتُ مع زملائي أن نخفق في تشخيص الكَلَب، لولا أننا تلقينا بعض المساعدة. فقد عاد طبيب <جينا> المحلي <H. دوناو> من عطلة نهاية الأسبوع، وقام بفعل ما يتعلمه طلبة الطب باعتباره أحد أساسيات الطب، ألا وهو تكرار أخذ التاريخ الطبي لما حدث لمريضته، وعلم بأمر الخفاش. وكان أخذ هذا التاريخ الطبي حاسما لنجاحنا، فقد اقترحت على الفريق الذي كان على وشك نقل <جينا> إلى مستشفانا استخدام معدات وقائية للاحتياط. ومع أن الباحثين ليس لديهم أي دليل على أن الكَلَب يمكن أن ينتقل من إنسان إلى آخر، فإن دموع ولعاب الحيوانات المصابة بالكَلَب تكون مملوءة بالڤيروس. وتلوث الجروح أو الأغشية المخاطية (في العين والجهاز التنفسي والفم) هو الكيفية التي تُديم الكَلَب في الطبيعة. لقد ارتدى أعضاء الفريق الطبي الذي كان يعتني بـ<جينا> أغطية واقية للرأس وأقنعة للوجه وأردية واقية وقفازات طوال الشهر الأول لمرضها. واقتضى تشخيص الكَلَب تحليل عينات من لعابها وجلدها ودمها وسائلها الشوكي ثم إرسال تلك العينات جوًّا إلى قسم الكَلَب في مركز مكافحة الأمراض والوقاية منها (CDC) بولاية أتلانتا، وبإمكان هذا المختبر تقديم النتائج الأولية في أقل من 24 ساعة.

في تلك الأثناء قمت بفحص <جينا>، وقد كانت نوامية، إلا أنها أدت الأوامر البسيطة، ولم يكن باستطاعتها استمرار الحفاظ على توازنها. وكانت تعاني ضعفا في ساقها اليسرى، وكانت **منعكساتها**[2] طبيعية، وهذا مكنني من استبعاد احتمال شلل الأطفال أو ڤيروس غرب النيل؛ كذلك كانت ذراعها اليسرى تنتفض بتقطع، وكان نمط الخدر في يدها اليسرى ونفض ذراعها اليسرى يرتبطان بموضع عضة الخفاش. ويقترح ذلك أن الكَلَب أكثر من الأخماج الشائعة هو الذي يسبب التهاب الدماغ. ولأن الأطباء غالبًا ما يعاينون صورا غير نمطية لمرض شائع أكثر من مرض نادر حقا، فقد طمأنتُ عائلة <جينا> والممرضات بأنه من المستحيل تقريبا أن تكون <جينا> مصابة بالكَلَب. وقد راهنتُ على نوع آخر من التهاب الدماغ، الأرجح أن يكون مناعيا ذاتيا، وهو أكثر انتشارا 1000 مرة من الكَلَب.

وكان لدينا 24 ساعة لإعداد خطة في حال كنتُ مخطئا. وفي الوقت ما بين فحص الحالات الأخرى، كنت أركز على واحدة من ركائز مهنة الطب ألا وهي التعمّق في البحث عن الأشياء. لقد عرفت الحكمة الشائعة وهي أن الكَلَب متى بدأ فلا يمكن لأي شيء أن يوقفه، لذا فقد كان محتما أن تكون <جينا> قد ماتت لو كان ذلك هو تشخيص حالتها؛ وكل ما كان بوسعنا عمله هو الإقلال من معاناتها. ولكنني أعرف أيضا أن الطب يتقدم دائما، لذا فربما «كان هناك شيء جديد». فالبحث في الإنتاج الطبي المتاح على **الإنترنت**[3] لم يظهر أي **حلول خارقة** breakthroughs، إلا أن التلكؤ ما بين

(1) **التهوية الآلية** mechanical ventilation: جهاز يساعد المريض على التنفس عندما يفشل في التنفس بذاته
(2) استجاباتها الانعكاسية
(3) online

كشف طبي ما ونشره قد يطول إلى 5 أعوام. لقد اتصلتُ بـ<كاثلين هانلون> [وهي خبيرة في الكَلَب في المركز CDC] وتلقيت منها معلومتين مُحبطتين: الأولى، أن تاريخ مرض <جينا> وفحصها يبدوان كما لو كانت حالة كَلَب خاصة «بهانلون»، والأخرى، أنه لم يطرح أي شيء واعد في اللقاءات العلمية أو التجارب السريرية الجارية حديثا.

ولأن الوقت كان محدودا، فقد قررتُ اتباع خطة بحث مختلفة. فتقريبا لم ينجُ أحدٌ من الكَلَب، لذا تجنبت ما نُشر عن كيفية معالجة المرض في الإنسان. والأبحاث بخصوص العلاجات تبدأ عادة بتأثير الأدوية في الفيروسات المزروعة في أنابيب الاختبار. ومع أنها خطوة أولى ضرورية، فإن الأدوية التي تبدو واعدة في الدراسات الأولية عادة ما تكون سامة أو لا يمكن إعطاؤها بكميات كافية في موضع الخمج. والشيء الذي شد انتباهي عندما نظرت فيما تبقى من مقالات هو ذلك اللغز الذي حيَّر خبراء الكَلَب لأكثر من 30 عاما: فمرضى الكَلَب يموتون تقريبا دون أي علة ظاهرة في دماغهم. وبالقدر نفسه من الأهمية عندما يموت مرضى الكَلَب بعد أسابيع من الرعاية المكثفة فإن الفيروس لا يمكن العثور عليه في أجسامهم، فالجهاز المناعي يتخلص من الفيروس مع الوقت، إلا أن الإزالة تحدث ببطء شديد بحيث لا تنقذ حياة المرضى.

ومن هاتين الحقيقتين ارتجلنا استراتيجيتنا وخطتنا، ففيروس الكَلَب يستطيع (على ما يبدو) أن يُكره الدماغ على قتل الجسد دون أن يؤذي نسيج الدماغ ذاته مباشرة. فإذا تمكنا من تعطيل الخلل في وظيفة الدماغ بالاستخدام الحذر للأدوية، بحيث نضع الفتاة <جينا> في حالة فقدان وعي طويلة، فقد نحدُّ من الدمار المحيق بجسمها، وربما أبقيناها حية مدةً طويلة كافية، بما يسمح لجهازها المناعي اللحاق للقيام بدوره كاملا.

ولاختيار أي عقاقير لها مدلول أوضح، فتشتُ في الأدبيات الطبية عن دراسات تربط الكَلَب **بالنواقل العصبية** neurotransmitters (وهي تلك الكيماويات التي يستخدمها الدماغ لنقل الإشارة ما بين الخلايا) أو **بالحماية العصبية** neuroprotection (وهو ذلك العلم الذي يستخدم الأدوية أو غيرها من تدخلات لحماية الدماغ من الأذى). وقد كشف تفتيشي هذا عن بحثين مذهلين لـ<H. تسيانك> وزملائه [من معهد لويس پاستور في باريس]. ففي أوائل التسعينات من القرن الماضي قدم <تسيانك> وزملاؤه تقريرا يفيد أن بمقدور الكيتامين (وهو مخدر) أن يثبط فيروس الكَلَب في العصبونات القشرية بالجرذان. وكان هذا البحث مطمئنا لثلاثة أسباب. الأول، أن البحث بيّن أن الكيتامين يؤثر بشكل جوهري في دورة حياة الفيروس، في حين ينتسخ الفيروس مادته الجينية داخل العصبونات [*انظر المؤطر في الصفحة 32*]. والثاني، أن الدواء يعيق فقط فيروس الكَلَب دون غيره من الفيروسات، وهذا يرجح أن تأثير العقار ليس نتيجةً سمية عامة للحيوان: والأخير أن عقارا مشابها، ولكنه أكثر سمية ويسمى MK 801، يثبط أيضا الكَلَبَ في عصبونات الجرذان، لذا فإن هذه الفائدة تنطبق على الأرجح على صنف بأكمله من المركبات.

لقد استخدم الجراحون، لأكثر من 25 سنة، الكيتامينَ لإحداث حالة فقدان الوعي أو لإبقائها لدى مرضاهم. مع أنه قد تم استبدال العقار على نطاق واسع نظرا لآثاره الجانبية الهلوسية (الهذيانية)، (والذين يستخدمون العقار بصورة غير مشروعة للاستمتاع يسمون الكيتامين K المفضّل) والمثير للاهتمام أن الآثار الجانبية للكيتامين تقدِّم، على ما يبدو، ميزة أخرى محتملة لمرضى الكَلَب: فالكيتامين يعمل واقيا عصبيا عن طريق إحصار بروتينات غشائية تسمى **مستقبلات كلوتامات** NMDA glutamate **NMDA** receptors، وهذه بإمكانها قتل العصبونات بعد أن تصير فائقة النشاط عقب سكتة دماغية أو أي نوع آخر من إصابة للدماغ. وتصوَّروا دهشتي عندما قرأت عن دواء قد يسهم في تثبيط الدماغ الذي به خللٌ، في حين ينشِّط، في الوقت ذاته، إزالة فيروس الكَلَب ويحمي الدماغ من المزيد من الأذى.

قرار يائس[**]

وبصفتي استشاريا للأمراض الخمجية (المُعدية)، لم تكن عندي المهارة لوضع <جينا> في حالة سبات بطريقة آمنة. لذا فقد طبقتُ ركيزة أخرى من ركائز الطب: اطلبْ المساعدة. وقد كنت جديدا في مستشفى الأطفال، لذا فقد طلبت إلى <J .M. تشوسيد> [وهو استشاري للأمراض الخمجية أعلى مرتبة] أن يساعدني على إيجاد اختصاصيين في حماية الدماغ. ولحسن الحظ كان جميع الخبراء موجودين في ذلك اليوم فقد كانت <K. تيفيز> و <N. غُنيّم> [ولهما خبرة في تقليل أذى الدماغ عقب الرض وعقب جراحات القلب المفتوح] مناوبتين في وحدة العناية المشدَّدة (المركزة) عندما وصلت <جينا>. وقد تضمن فريقنا أيضا <C. إميلي ليفوند> [وهي طبيبة أعصاب متخصصة في خمج الفيروسات] و<M. شواب> [الخبير في الصرع والذي كان بمقدوره تزويدنا برصد مستمر لموجات الدماغ للتحكم في السبات]. و<G. هوفمان> اختصاصي التخدير للفريق الذي تعرّف خطتنا لإحداث السبات باعتبارها ممارسة نمطية لحالات مرضية أخرى.

المعالجة التي أنقذت <جينا>[*]

في يوم 2004/10/19، بعد يوم من وصول <جينا كَيسي> إلى مستشفى الأطفال في ميلووكي، أكد الأطباء أنها مصابة بالكلب واستخدموا الكيتامين والميدازولام لإبقائها في حالة سبات. وعلى مدى الأسابيع الستة

تبدأ العلاج بالبيوبترين

تُطعم نفسها

تتكلم كلاما مفهوما

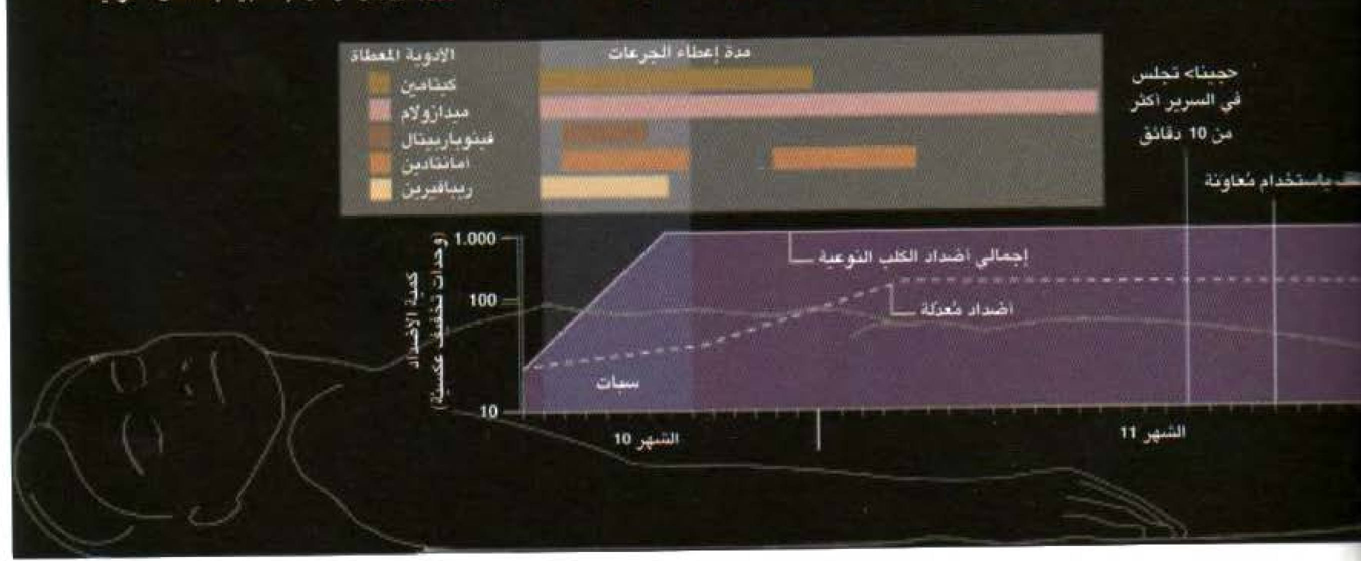
1/1: <جينا> تغادر المستشفى

الشهر 12

(*) THE TREATMENT THAT SAVED JEANNA

(**) A Desperate Decision

التالية أعطوها فينوباربيتال (مُركِّن) وأمانتادين (عنصر مضاد للفيروسات يساعد على حماية الدماغ) وريبافيرين (دواء مضاد للفيروسات عموما). وعندما خرجت «جينا» من حالة السبات كان جهازها المناعي ينتج كميات كبيرة من الأضداد المقاومة للكلب ولاسيما الأضداد المعدِّلة التي تمنع الفيروس من غزو خلايا جديدة. ولكن شفاءها كان بطيئا إلى أن أعطاها الأطباء البيوبترين وهو مركب شبيه بحمض الفوليك.



لقد أوصى أعضاء الفريق بعلاجات أخرى لتخفيف الآثار الجانبية للكيتامين ومنح المزيد من الحماية العصبية وبلوغ السبات الذي هو هدفنا العلاجي. وكذلك أوصوا بالأمانتادين، وهو مضاد للفيروسات وقد يساعد أيضا على إعاقة المستقبلات العصبونية NMDA، فيرتبط بها في موضع مختلف عن ذلك الذي يحصره الكيتامين. وكذلك الميدازولام (وهو مهدئ من مجموعة البنزوديازيپين) والفينوباربيتال، اللذان قد يساعدان أيضا على إيقاف نشاط دماغ «جينا». فيما بعد اقترح «C. روبريخت» [وهو خبير في الكلَب بالمراكز CDC] إعطاء مضاد عام للفيروسات وهو الريبافيرين، مع أنه قد سبق تجربته على مرضى الكلَب دون أي نجاح. ولكننا دائما نصغي للأشخاص البارعين.

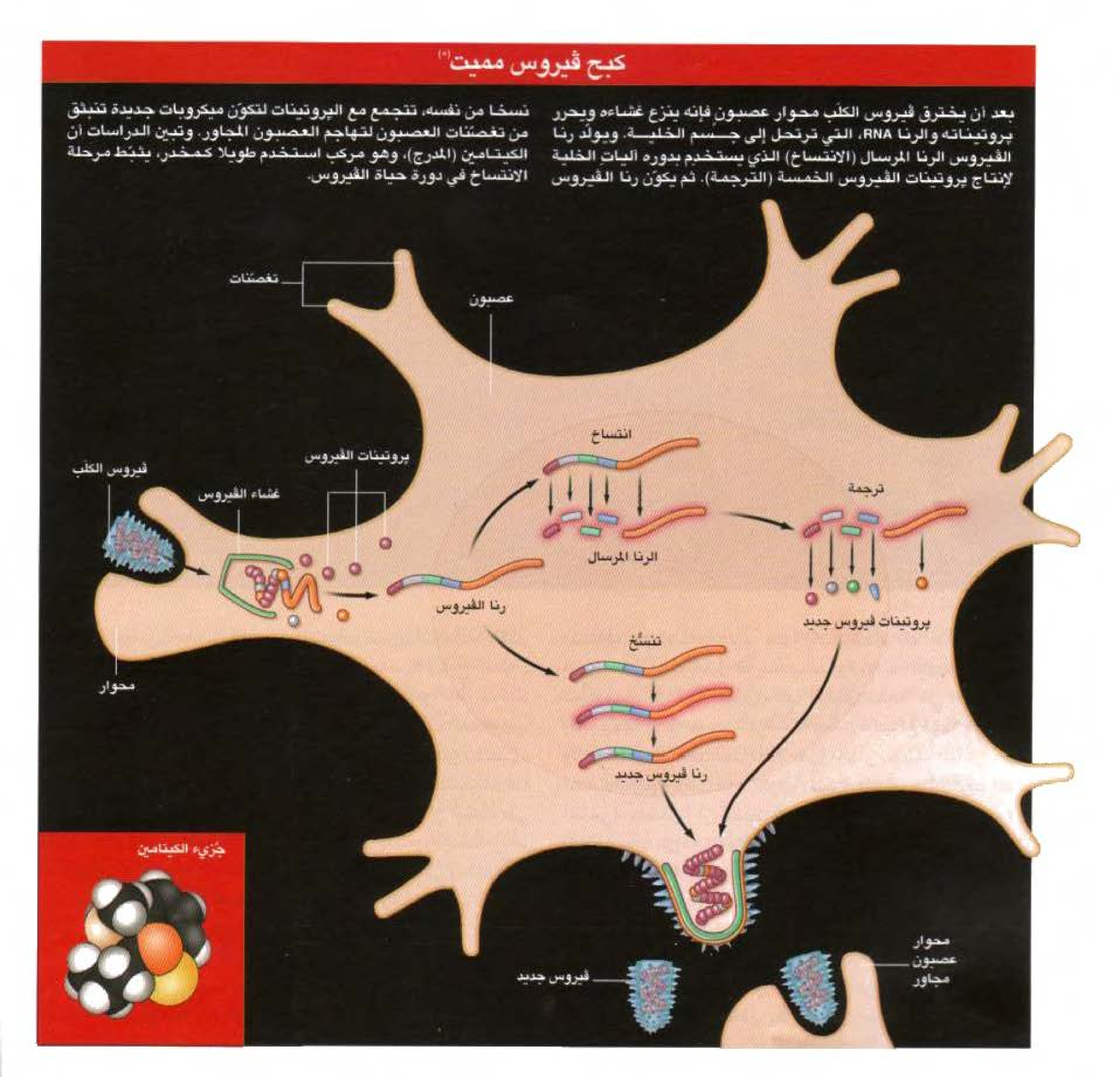
إن وجود وفرة من الاستشاريين في كل تخصص أتاح لنا نقدَ الفرضية، والتقرير فيما إذا كان من الأمان أن نتابع. فعندما تُجرّب أشياءُ جديدة في الطب أو البيولوجيا (علم الحياة) فإنها عادة ما تفشل وغالبا ما تسبب ضررا. لذا يُفترض أن تبدأ العلاجات من أنبوب الاختبار، إلى الدراسة على الحيوانات، ثمّ إلى التجارب السريرية. لقد بدت فرضيتي بسيطة جدا، وقد تسبب نتيجة طبية أسوأ حتى من الموت فأربعة من كل خمسة ناجين محصنين من الكلَب انتهوا بإعاقات خطرة.

لقد اجتمعنا مدة ساعة بعد أن أكّد «روبريشت» أن «جينا» مصابة بالكلَب. وقد أبلغنا والديها بالتشخيص وشرحنا لهما الخيارات التقليدية. ثم اقترحنا عليهما علاجنا. ولأن موت «جينا» كان محتما فقد طلب والدا «جينا» إلينا أن نجرب شيئا جديدا، بحيث يكون هناك المزيد من المعرفة لصالح الطفل التالي المصاب بالكلَب.

وقد قدرنا أن الجهاز المناعي لـ«جينا» قد يحتاج ما بين 5 و 7 أيام لإنتاج الأضداد التي تستهدف فيروس الكلب، ومن خبرتنا من حالات الكلَب السابقة لدى البشر، علمنا أن الاستجابة المناعية العصبية ستكون عنيفة بمجرد أن تُستثار. وأخذنا في الاعتبار أن دماغ «جينا» مملوء فعلا بفيروس الكلَب. لذا، فمن غير المحتمل أن نستفيد من إضافة المزيد منها باستخدام اللقاح المحتوي على الفيروسات المقتولة، بل قد يسبب ضررا بحرفِ الاستجابة المناعية الطبيعية بعيدا عن الفيروسات الموجودة فعلا في دماغ «جينا» وتوجيهها نحو المتحولات المُمثَّلة بصورة مبالغ فيها في اللقاح. ولأسباب مماثلة فقد اخترنا ألا نعززَ جهاز «جينا» المناعي بحقنها أضدادا نوعية للكلَب أو الإنترفيرونات (وهي پروتينات تزيد النشاط المناعي). واخترنا أن نُحدث السباتَ في «جينا» لمدة أسبوع، وأن نحلل عينات من دمها وسائلها النخاعي على امتداد تلك الفترة للتأكد من أنها تنتج أضدادها الخاصة.

ومع أن الفوضى العارمة تميز الرعاية النهائية للكلَب (بما فيها تأرجحٌ عنيفٌ في معدل نبضات القلب وضغط الدم)، فإننا لم نصادف أي انتكاسات رئيسية أثناء سبات جينا. وبانتهاء الأسبوع بدأ جسمها بإنتاج كميات كبيرة من الأضداد **المُستعدِلة** neutralizing التي تمنع الفيروس من غزو خلايا جديدة وربما تزيل الميكروبَ بطرق أخرى غير معروفة. ولكن الاختبار الحقيقي سوف يأتي يوم نعيد «جينا» للوعي. وكان اليوم الذي أخرجنا فيه «جينا» من السبات أسوأ يوم في حياتي: فقد كانت «جينا» مشلولة تماما وعديمة الاستجابة، ولم يكن لدينا أي فكرة عما إذا كانت حية أو ما الذي سيحدث بعد ذلك، ولكننا كنا نعلم أن مرضى الكلَب قد يبدون خطأً موت الدماغ، لذا لم نفقد الأمل. وفي اليوم التالي حاولت «جينا» أن تفتح عينيها. وفي وقت لاحق تطورت لديها استجابة انعكاسية في ساقيها. وبعد ستة أيام كانت تديم النظر إلى وجه أمها (مُفضّلة إياه على وجهي) وتفتح فمها لتساعد ممرضتها على تنظيفه. وبعد 12 يوما أمكنها الجلوس في سريرها.

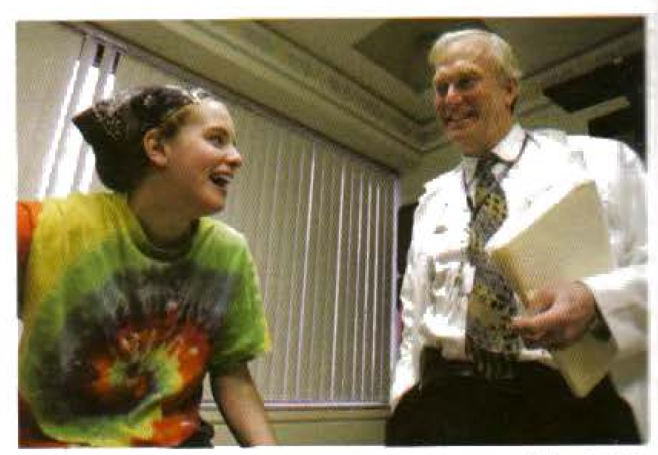
إن الشلل التام يتسبب في حالة حادة من زوال التكيّف في الجسم، فالقوة والقدرة على الاحتمال والتكيف تكون كلها مفقودة، إضافة إلى قابلية البلع والكلام. لقد استحوذ شفاء «جينا» على قدر هائل من العمل الشاق. ففي الشهرين الأولين تعرّضت لتأخير مربك:



فمثلا أحرزت تقدما سريعا في المشي وأداء التمرينات ولكنها لم تكن قادرة على الكلام أو البلع وتبقّت لديها مشكلات أخرى، مثل تراكم حامض اللبن في جسمها والذي جعلني أفكر في الاضطرابات الاستقلابية (الأيضية). وفي استشارة مع «W. ريبيد» [وهو المختص في علم الجينات بمستشفانا] شخّصنا الحالة على أنها عوز مكتسب **للبيوپترين** biopterin. ويشبه البيوپترين كيماويا حمض الفوليك وهو الڤيتامين B الأساسي لنمو الخلية. والمركب موجود بكميات محدودة في الدماغ، حيث هي حاسمة لإنتاج النواقل العصبية، مثل الدوبامين والإبينفرين والنورإبينفرين والسيروتونين والملاتونين. ويتحكّم البيوپترين في كيفية صيانة أحد إنزيمات الدماغ (سينثيتاز أكسيد النيتريك العصبوني) لتوتر الأوعية الدموية المغذية للدماغ. وفي الحقيقة أدركنا أن الكميات الضئيلة من البيوپترين بإمكانها أن تفسر معظم أعراض الكلَب عدا التأثيرات الأخيرة في الأعصاب المحيطية.

لقد كان ذلك انفراجا مذهلا، لأن البيوپترين متاحٌ كإضافة تؤخذ بالفم. وبعد حصولها على البيوپترين استطاعت «جينا» الكلام والبلع مرة أخرى. وقد أتاح التحسن السريع لها أن تغادر المستشفى يوم 2005/1/1، قبل ثلاثة أشهر من الموعد الذي كان متوقعا لها. وأثبتنا من حينها أن عوز البيوپترين قد ظهر في مريض الكلَب الوحيد الآخر الذي حُفظت منه عينات بطريقة مناسبة. ونحن نختبر احتمال وجود مستويات منخفضة من البيوپترين في الأنواع الأخرى من الحيوانات الأخرى المخموجة بالكلَب. فإذا كان الأمر كذلك فإن العوز قد يساعد على تفسير الكيفية التي يخرب بها الڤيروس الجسمَ. أما لماذا يخفّض الكلَب

(*) CURBING A DEADLY VIRUS



شفاء استثنائي: <جينا كيسي> (تظهر مع المؤلف) تتخرج في المدرسة الثانوية هذا العام وتأمل أن تصبح طبيبة بيطرية. والأشياء التي تُذكّر بصراعها مع الكَلَب هي خدر في إصبعها المعضوضة وتغيّرٌ في قوة ذراعها اليسرى وخطوة أوسع عندما تجري.

البيوبترين (ومعظم اخماج الدماغ تزيده) فهو أمر غير واضح. وقد أعددنا العدة لاختبار ومعالجة عوز البيوبترين في مرضى الكَلَب المستقبليين الذين يتلقون بروتوكول ميلووكي.

خلاف يمكن البحث فيه(*)

في الذكرى السنوية الأولى لتشخيص الكَلَب لديها، حضرت <جينا> لقاءً دوليا للباحثين العلميين عن الكَلَب (عُقد في كندا) كضيفة شرف في حفل العشاء الاحتفالي، حيث ألقت كلمة. وقد عادت للالتحاق بزملائها الأصليين في السنة الأولى بمدرستها الثانوية وحصلت على علامات ممتازة، وكذلك حصلت على تصريح قيادة سيارة مؤقت. وكانت الأشياء التي تخلّفت من صراعها مع الكَلَب هي: رقعة صغيرة من الخَدَر في إصبعها التي عضها الخفاش وتغيُّر في توتر ذراعها اليسرى وخطوة أوسع عندما تجري. وقد تخرَّجت في مدرستها هذا العام، وتأمل أن تصبح بيطرية.

ولكن هل بإمكان بروتوكول ميلووكي إنقاذ أي أرواح أخرى؟ لقد استُخدمت هذه المعالجة ست مرات خلال العامين الماضيين من دون أي نجاح يذكر في ألمانيا وإيطاليا والهند وتايلاند والولايات المتحدة. ولسوء الحظ فإن العديد من المحاولات خالفت افتراضات جوهرية في نظريتنا أو أنها لم تستخدم معظم الأدوية في نظام <جينا>. إن المجتمع الطبي كان ممانعا لتكرار علاجنا. وكان هناك بعض الخبراء الذين عارضونا علانية. إن هذه المقاومة مفهومة، لأن بقاء <جينا> على قيد الحياة كان يعارض الدراسات المختبرية التي تبيّن أن فيروس الكَلَب يقتل خلايا الدماغ، ولكن هذه الدراسات قد تكون مضللة لأن سلالات الكَلَب في المختبر قد تكون أكثر قابلية لإحداث موت الخلايا من الفيروسات التي تجول في الطبيعة.

وقد جادل خبراء آخرون بأن <جينا> بقيت حية لأنها خُمجت بسلالة ضعيفة على نحو غير عادي من الكَلَب. وهذا النوع من الجدل من الصعب الرد عليه، لأننا لم نعزل عينات من الفيروس من جسم <جينا> (وقد حصلت المراكز CDC على أضداد نوعية للكَلَب من <جينا> وليس على الفيروس نفسه، لأنه من الصعب عزله). وتحليل فيروس الكَلَب الذي يحمله الخفاش يبين أنه مختلف عن تلك السلالات الموجودة في الكلاب وعنده نزوع أكبر للتضاعف في الجلد عوضا عن العضلات، ولكن فيروس الخفاش ليس أقل قتلا من **نسخة الكلبيات** canine version.

وربما تكون أفضل طريقة للرد على تلك التهم هي تطبيق علاجنا على الحيوانات المصابة بالكَلَب لتعيين الأجزاء الحاسمة في هذا البروتوكول (إحداث السبات أو الأنشطة المضادة للفيروسات أو تعطيل المستقبلات NMDA) من أجل مكافحة الكَلَب. وقد طلبنا إلى ست كليات للطب البيطري أن تسمح بهذه الدراسات، ولكن المسؤولين في هذه الكليات كانوا يخشون معالجة حيوانات مصابة بالكَلَب في وحدات العناية المركزة لديهم. إن قلة مواصلة الأبحاث هي خسارة عالمية، لأنه لا يمكننا معرفة فيما إذا كانت استراتيجيتنا فاعلة حتى يجربها الآخرون. فإذا ما أمكن تكرار نجاحنا فسوف يتمكن الباحثون من تعيين أي الأدوية هو فعالٌ وبأي جرعة، وفيما إذا كان بإمكان البيوبترين تقليص فترة النقاهة بشكل ذي دلالة. إضافة إلى ذلك، على الأطباء إيجاد طرق لتخفيض تكلفة العلاج وإعادة التأهيل (والتي بلغت 000 800 دولار على الأقل في حالة <جينا>) لجعلها ممارسة مقبولة في الدول النامية، حيث لا يزال الكَلَب أكثر شيوعا. وسيكون أمرا غير معقول أن تتحول نسبة الوفيات من الكَلَب من 100% إلى شفاء 100%. ولكن لدينا الآن على الأقلّ الفرصة لتحسين هذه الاحتمالات. ■

(*) A Curable Controversy

(1) **سابقات المضادات الحيوية** probiotics، أو سابقات الصادات.

(2) **شبكة ميراكل (المعجزة) للأطفال** The Children's Miracle Network: هي الاتحاد الرئيسي لمستشفيات الأطفال الرئيسي، وهي مؤسسة غير ربحية تسعى لتأمين الدعم المالي لمئة وسبعين مستشفى للأطفال في أمريكا الشمالية.

المؤلف

Rodney E. Willoughby, Jr.

*أستاذ مشارك في طب الأطفال بكلية الطب في ويسكونسن واستشاري الأمراض الخمجية (المُعدية) بمستشفى الأطفال في ويسكونسن. وهو خريج جامعة برينستون وكلية طب جون هوبكنز مع تدريب ما بعد الدكتوراه في طب الأطفال وأمراض الأطفال الخمجية والكيمياء الحيوية للسكريات والاستقصاءات السريرية. وتتضمن اهتماماته البحثية الكَلَب والشلل الدماغي وتدوير المضادات الحيوية (الصادّات) و**سابقات المضادات الحيوية**(1) للإقلال من الخمج المقاوم للمضادات الحيوية في المستشفيات. وتلقّى في عام 2006 جائزة الإبحار من شبكة ميراكل للأطفال(2).*

مراجع للاستزادة

Inhibition of Rabies Virus Transcription in Rat Cortical Neurons with the Dissociative Anesthetic Ketamine. B. P. Lockhart, N. Tordo and H. Tsiang in *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, Vol. 36, No. 8, pages 1750–1755; August 1992.

Prophylaxis against Rabies. C. E. Rupprecht and R. V. Gibbons in *New England Journal of Medicine*, Vol. 351, No. 25, pages 2626–2635; December 16, 2004.

Survival after Treatment of Rabies with Induction of Coma. R. E. Willoughby, Jr., K. S. Tieves, G. M. Hoffman, N. S. Ghanayem, C. M. Amlie-Lefond, M. J. Schwabe et al. in *New England Journal of Medicine*, Vol. 352, No. 24, pages 2508–2514; June 16, 2005.

More information about rabies and the Milwaukee protocol is available at www.mcw.edu/rabies

Scientific American, April 2007

ثدييات أمريكا الجنوبية المفقودة(*)

توضح الاكتشافات الأحفورية المدهشة في جبال الأنديز التشيلية وجود مجموعة غير متوقّعة من ثدييات فريدة كانت يوما ما تتجوّل في أمريكا الجنوبية. وقد قلبت هذه الاكتشافات معرفة كانت راسخة حول التاريخ الجيولوجي لهذه القارة.

<J.J. فلاين> ـ <A. R. وايس> ـ <R. تشاربير>

على أطراف سهل عشبي منبسط يرعى بهدوء، وفي غفلة عن قدرها المُهدِّد، زوج من **الحيوانات الحافرية** hoofed grazers التي تشبه الخيول وأحد الحيوانات الحافرية القديمة التي تشبه الظباء، **والكسلانيات الأرضية** ground sloth[(1)] ويشاركها الغفلة في الجوار حيوان **الشينشيلا** chinchilla[(2)] وحيوان **كيسي** marsupial صغير كالجرذ يقصم البذور. وفجأة ينفجر في الأفق بصورة كارثية بركان مغطّى بالثلوج، مرسلا فيضا من الرماد الطيني نحو منحدراته الشديدة. وبعد ذلك يتدفق هذا الطين المضطرب بسرعة عبر الأراضي المنبسطة دافنا في طريقه الحيوانات غير المتنبهة له.

وبقدر ما كان الخراب الناتج من هذا التدفق البركاني مدمرا للكائنات التي دفنها، فإنه قد أصبح هدية لعلم الأحافير (الپاليونتولوجيا). وبعد عشرات ملايين السنين من الموت غير المتوقع لهذه الثدييات، فإن القوى البانية للجبال وعمليات التحات التي تبعتها قد عرّت بقايا هياكلها الأحفورية فأصبحت واضحة في ضوء النهار في مرتفعات جبال الأنديز بأواسط تشيلي. وقد اكتشف فريقنا أول هذه العظام في عام 1988 بينما كنا نفتّش عن بقايا الدينوصورات في أحد الأودية الرافدة **لنهر تنكويريريكا** Tinguiririca River قرب الحدود مع الأرجنتين. وثبت أن الاكتشاف الأولي لعظام الثدييات كان مثمرا إلى أبعد الحدود، فقد عدنا إلى المنطقة من حينها كل عام تقريبا. ومنذ ذلك الحين وحتى الآن اكتشفنا أكثر من 1500 أحفورة من الثدييات القديمة من عشرات المواقع في أواسط جبال الأنديز التشيلية.

لقد أدّى التحليل المختبري المضني لمجموعة عيناتنا المتنامية إلى إظهار أسرار رئيسية من تاريخ الثدييات القديمة لأمريكا الجنوبية. والشيء المدهش أنّ عمر الأحافير التشيلية يراوح بين 40 مليون و 10 ملايين سنة ـ وهو أحدث كثيرا ممّا توقعناه. وبالفعل، فإن الكثير من العينات يمثل البقايا الثديية لأجزاء فقط من تلك الفترة الزمنية الموجودة في كل مكان في أمريكا الجنوبية. وقد أضاءت بعض هذه الأحافير الفريدة فترة مظلمة سابقا من تاريخ سلالات الثدييات الأصلية في هذه القارة؛ في حين ساعدت أحافير أخرى على حل الجدل المديد حول منشأ الجماعات المهاجرة الأساسية. وقد صحح هذان النوعان من الأحافير فهمنا للزمن الذي ظهرت فيه بعض النظم البيئية والزمن الذي تشكلت فيه الجبال نفسها ـ في هذا الجزء من العالم.

اكتشاف مضن(***)

يستند معظم ما يعرفه العلماء عن الثدييات القديمة في أمريكا الجنوبية إلى إشارات اكتشفت في الأطراف الجنوبية البعيدة من القارة وبخاصة في منطقة **پتاكونيا** Patagonia[(3)] تحوي هذه المناطق

نظرة إجمالية/ فيض من الأحافير(**)

- **إن عينات أحافير الثدييات، التي تربو على 1500 عينة، المكتشفة في أواسط جبال الأنديز التشيلية تتضمن مجموعة استثنائية من الأنواع الجديدة، إضافة إلى أقدم بقايا القوارض المعروفة في قارة أمريكا الجنوبية.**
- **تُجسّر هذه الأحافير، التي يراوح عمرها بين 40 مليون و 10 ملايين سنة، الثغرات في التاريخ المعروف لثدييات أمريكا الجنوبية الاستثنائية.**
- **توثّق بعض هذه الأحافير وجود مراع يعود عمرها إلى 32 مليون سنة، وهي تسبق أمثال هذه الأنظمة البيئية في أي مكان آخر في العالم بنحو 15 مليون سنة.**

(*) South America's Missing Mammals
(**) Overview/ Fossils Galore
(***) Tantalizing Discovery
(1) الكسلانيات: ثدييات تعيش على الأشجار وتنتمي إلى رتبة الدرد.
(2) حيوان من القوارض بحجم أرنب وله ذنب طويل يعيش في أمريكا الجنوبية.
(3) الجزء الجنوبي من الأرجنتين. (التحرير)



في هذه اللوحة الفنية تبدو لدبيات غريبة قطنت يوما أمريكا الجنوبية، وهي ترعى غافلة عن فيض عنيف من الرماد البركاني الطبني سماني فجأة من بركان مجاور ويؤدي إلى هلاكها.

تكشفات كثيرة لصخور مثالية حاملة للأحافير كالغضار والحجر الرملي وتشكلات أخرى متصلبة ترسبت في بيئة الأنهار وسهولها الفيضية. وقبل زيارتنا الأولى إلى تشيلي، لم يفتّش الباحثون بصورة منهجية عن أحافير الحيوانات البرية في المناطق الجبلية لذلك البلد، لأنّ معظم صخورها صخور بركانية (إذ من المفترض أن تكون **اللابات**(1) والمواد المندفعة من البراكين حارة جدا ومخربة لا تتيح حفظ البقايا العضوية).

ومع ذلك قرّرنا أن نجرّب حظنا في أن وادي «تنكويريريكا» يمكن أن يحوي أحافير خاصة عندما علمنا من تقرير عن وجود آثار أقدام الديناصورات فيه. كان عمر الصخور هو العمر الصحيح نفسه ـ فقد افترض الجيولوجيون حينذاك أنّ عمر معظم الصخور على امتداد سلسلة جبال الأنديز التشيلية يعود على الأقل إلى ما قبل 65 مليون إلى 100 مليون سنة، أي إلى الجزء الأخير (الأحدث) من **حقب الميزوزوي**(2) Mesozoic، وهو الزمن الذي وصلت فيه الديناصورات إلى أوج تطورها. لقد علمنا أنّ أيا من الرواسب التي تحوي آثار أقدام لا بدّ وأن تحوي أيضا بقايا عظمية من الحيوانات التي تركت آثار أقدامها. فإذا كنا محظوظين جدا وراقبنا الأرض جيدا، فإننا قد نجد أحفورة من الثدييات الصغيرة التي عاصرت الديناصورات والتي لم تكن أكبر من **الزبابة** shrew (ثديي من آكلات الحشرات).

وفي اليوم الأخير من رحلة استطلاع دامت أسبوعا عام 1988، انقسم فريقنا المكون من أربعة باحثين لاستكشاف المنحدرات الشديدة المحيطة بجانبي نهر «تنكويريريكا» ومباشرة تقريبا، وصل الاثنان اللذان يعملان شمال النهر إلى طبقة

(1) لابة Lava جمعها لابات.
(2) حقب الحياة المتوسطة. (التحرير)

اكتشاف الأحافير(*)

اعطت اكثر من دزّينة من المواقع في جبال أنديز وسط تشيلي، ومن ضمنها المواقع المشار إليها في *اليسار (بنقاط)*، مئات من أحافير الثدييات منذ أن اكتشف المؤلفون في البداية تراكما لعظامها في وادي «تنكويريريكا Tinguiririca» في عام 1988. وهذه البقايا الثديية القديمة التي يراوح عمرها ما بين 40 مليون و 10 ملايين سنة هي الأولى التي وُجدت في هذه المنطقة من أمريكا الجنوبية. وإنّ معظم أحافير القارة من الثدييات يأتي من منطقة أبعد نحو الجنوب في باتاكونيا Patagonia. وقد حفظت البقايا في رواسب بركانية من تشكيلة أبانيكو Abanico *(اللون البني)* التي تنكشف على مساحة آلاف الكيلومترات المربّعة من أراض شاهقة شديدة الانحدار.

الرواسب التي تحمل آثار الدينوصورات، وتابعا بعد ذلك المسير نحو أعالي الوادي بحثا عن رواسب أخرى يحتمل أن تحوي أحافير. ولكن ما خيّب آمالهم أنّ الأحافير الوحيدة التي وجدوها كانت أحافير الأسماك والأمونيتات ومخلوقات بحرية أخرى - ولكنهم لم يجدوا زواحف أو ثدييات. وفي الوقت نفسه عاش أعضاء الفريق الذين يعملون جنوب النهر يوما عصيبا مشابها. ولكن ارتفعت معنوياتهم عند عصر ذلك اليوم عندما لمحوا بضعة أجزاء من العظام والأسنان من بقايا الأحافير تبرز من بقعة كبيرة من رواسب بركانية بنية اللون مائلة إلى الاحمرار تقع على ارتفاع 1000م فوق قاع الوادي. وقد أوضح الفحص أنّ الأحافير كانت لحيوانات فقارية برية بحجم الحصان الصغير تقريبا.

في البداية، حاولنا أن نقحم هذه الأجزاء الأحفورية في الفكرة السائدة عن عمر الصخور - حيوانات بهذا الحجم يجب أن تكون دينوصورات أو وحوش **ميزوزوية**[1] غريبة أخرى. ولكن ثمة قصة مختلفة يكشف عنها وجود الأسنان المتمايزة المعقّدة مع طواحن (أضراس) ذات تيجان مرتفعة مستوية القمة ومتعددة الوجوه التي تمتاز بها بعض الثدييات. لقد كانت هذه الثدييات بكل وضوح كبيرة ومتطورة إلى حد بعيد لا يمكن معه أن تكون قد عاشت قبل 50 مليون سنة. ويبدو أن الجيولوجيين كانوا بعيدين كل البعد في تقديرهم لعمر هذه الصخور. وبالفعل، فقد أثبتت التحاليل اللاحقة أنّ الأحافير الجديدة قد جاءت من حقب **السينوزوي**[2] Cenozoic. وهي الفترة الزمنية الراهنة من تاريخ الأرض التي بدأت عندما انقرضت الدينوصورات **اللاطيرية** nonavian قبل 65 مليون سنة. (تُعرف الطيور الحالية بأنّها **تيروبودات** theropods، وبذلك فإنّها تمثّل مجموعة من الدينوصورات التي لاتزال على قيد الحياة)

مجموع حيواني جزيري(**)

يعد اكتشاف أي نوع من الأحافير أخبارا عظيمة لنا. فإن كانت من الثدييات - وبصورة غير متوقعة من الثدييات الحديثة - كان ذلك أكثر من كاف لحفزنا إلى أن نركز موسمنا الميداني التالي على تلك البقعة بعينها. لقد عدنا ثانية إلى وادي تنكويريريكا في الصيف الجنوبي من عام 1989، بعد أن ذابت ثلوج الجبال العالية بصورة تتيح للسلطات المحلية إعادة بناء طريق الوصول الضيقة التي تتهدّم كل فصل ربيع تقريبا. وفي هذه الرحلة وصلنا إلى موقع الأحافير صباح يوم مشمس صاف من أيام الشهر الأول من العام، مع طاقم مؤلّف من سبعة علماء وتجهيزات حملة كاملة. وبسرعة أنزلنا حمولة الحيوانات ونصبنا الخيام بالقرب من نهر صغير وبدأنا بالتفتيش عن الأحافير.

ومما أبهجنا ظهور كُسارات عظمية رائعة وأسنان، وكان ذلك بعد دقائق من بداية تمشيط منحدر التل. فقد برزت، عند طرفي عقيدة من الصخر بحجم حبة البطاطا، جمجمة أكيدة لحيوان ثديي، بدليل وجود عظمتي فكها السفلي المفردتين، من بين صفات أخرى. (تتألّف الفكوك السفلى في الزواحف من عظام منفصلة كثيرة). وفيما بعد، سنصف ذلك الكائن رسميّا بأنّه نوع جديد من **الحافريات القديمة** notoungulate، وهي مجموعة غير متجانسة من الحافريات العاشبة يتراوح حجمها بين الأرنب وفرس النهر، وقد انقرضت قبل أقل من مليون سنة. ويحتمل أنّ هذا النوع الجديد يشبه قليلا **الظبي** antelope. فقد كشفت الأسنان التي وجدناها في السنة السابقة أنّها تعود إلى أحد الحافريات القديمة الشبيهة بوحيد القرن. ومجمل القول، إنه في أثناء الفصول الثلاثة الأولى من العمل الحقلي في تنكويريريكا، أحضرنا أكثر من 300 عينة تتضمّن **جرابيات (كيسيات)** marsupials **وأوائل كسلانيات** early sloth

(*) Finding Fossils
(**) Island Menagerie
(1) تنتمي إلى حقب الحياة المتوسطة
(2) حقب الحياة الحديثة (التحرير)

ومدرّعا armadillos وأحد القوارض الشبيه بالشينشيلا chinchillalike.

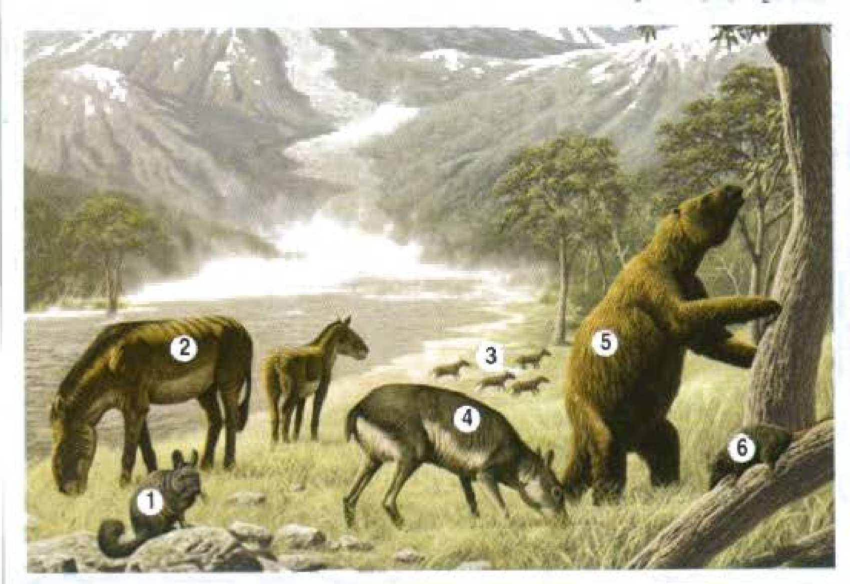
قد تحتاج معرفة الأهمية الكاملة لاكتشافاتنا إلى سنوات، ولكنّنا عرفنا مباشرة أنّنا أمام شيء عظيم. احتوت هذه الأحافير الجديدة بكل وضوح على الكثير من المعلومات حول تاريخ ثدييات أمريكا الجنوبية الحالية المتميّزة ـ من بينها الكسلانيات والنسانيس وآكلات النمل والشينشيلانيات. وقد تطورت أسلاف هذه الحيوانات الحالية التي تشمل الكثير من المخلوقات التي وجدناها في وادي تنكويريريكا. عندما كانت قارة أمريكا الجنوبية جزيرة. وبسبب حركة الصفائح الأرضية، بقيت أمريكا الجنوبية منفصلة عن الكتل القارية الأخرى معظم 80 مليون السنة التي أعقبت تقطّع قارة بنجيا Pangaea العملاقة وقسمها الجنوبي، قارة كوندوانا Gondwana. وقد شجعت فترة الانعزال الجغرافي هذه على تطور ثدييات أصلية تكيّفت مثاليا مع ظروف هذه الجزيرة وكل شيء غريب مثل الحيوانات الفطرية (الأصلية) indigenous في الجزر الحديثة كأستراليا (مثال البلاتيبوس ذي منقار البط ودب الكُوال) ومدغشقر (المشهورة بليموريّاتها). وتتضمن أسلاف مجموعات أمريكا الجنوبية الحديثة الاستثنائية الجِرابيات القافزة، والجرابي السيفي الأسنان «القطط الزائفة» pseudocats، وأقرباء المدرّع المجهّز بذيل ضخم على شكل هراوة مرصّع بأشواك، وقوارض بحجم الدببة، وكسلانيات كبيرة بحجم الفيلة، وكسلانيات تسبح في البحر (الكسلانيات السابحة).

جُمعت المعلومات عن أسلاف الثدييات الحالية التي تعيش في أمريكا الجنوبية، من الاكتشفات الأحفورية السابقة في پتاكونيا Patagonia ومناطق أخرى، غير أنّ المعلومات الحاسمة عن الكثير من هذه الأسلاف بقيت محيّرة. فقد عرف علماء الأحافير مثلا أن الكسلانيات وآكلات النمل قد بدأت قبل 40 مليون سنة كما فعلت عدة سلالات شاذّة هي الآن منقرضة (تتضمّن بعض الجرابيات والحافريات القديمة). ولكن لم تُكتشف على الإطلاق أحافير تُمثّل الانتقال إلى المرحلة الثانية من تاريخ الثدييات في أمريكا الجنوبية ـ منذ قرابة 40 وحتى 30 مليون سنة. والشيء الأكثر إثارة لنا في السنين القليلة الأولى من عملنا، كان في تنامي تحققنا من أن الحيوانات التي وجدناها في وادي تنگويريريكا عاشت في أثناء هذه الفترة من تاريخ مجهول سابقا

لقد ساور علماء الأحافير الشك في أنه في أثناء هذه الثغرة الغامضة في السجل الأحفوري، فإن الكثير من السلالات الفريدة بأمريكا الجنوبية دخلت في عملية تنوّع سريع جدا. وبالفعل، تحوي عيناتنا أقدم تسجيل لعدة مجموعات من الحافريات القديمة وتمثّل على الأقل 25 نوعا من الثدييات وجميعها تقريبا أنواع جديدة لم يكتشفها العلم من قبل [انظر *المؤطّر في هذه الصفحة*]. وقد شهدت هذه الفترة أيضا وصول القوارض و**الرئيسات**[1]، وكلاهما لم يكن من الثدييات الأصلية التي كانت تقطن أمريكا الجنوبية

جماعة ممثلين[*]

في أثناء خمسة فصول من استكشاف وادي «تنكويريريكا» بأواسط تشيلي، اكتشف فريقنا أحافير 25 نوعا تقريبا من الثدييات. عاشت هذه الحيوانات القديمة قبل نحو 32 مليون سنة، ومعظمها جديد على العلم. وتعرف كمجموعة باسم حيوانات التنكويريريكا، وتضم أكثر من 300 عينة فردية تمثّل قوارض أمريكا الجنوبية الأقدم بما في ذلك شكل شبيه بحيوان الشينشيلا لم يُسم بعد *(1)*. وتعد أحافير نوع جديد من حيوان شبيه بالحصان إيومورفيپوس *(2)* Eomorphippus وسانتياكوروثيا تشيليّانسيس *(3)* Santiagorothia chiliensis الممثل الأقدم لمجموعتين صغيرتين من الحافريات القديمة، آكلات عشب حافرية أصبحت منقرضة في العشرين ألف سنة الماضية. ويتضمّن المجموع الحيواني أيضا أكبر تنوّع في أمريكا الجنوبية من الحافريات القديمة المعروفة باسم أركيوهيراكوئيدس archaeohyracoids، من بينها أركيوتيپوتيريوم تينكويريريكاينس *(4)* Archaeotypotherium tinguiriricaense. تنفرد منطقة تنكوريريكا بوجود بسيدوكليپتودون تشيلنسيس *(5)* Pseudoglyptodon chilensis النسيب الأقرب المعروف للكسلانيات والحيوان الشبيه بالزبابة: كلوهنيا شاريري *(6)* Klohnia charrieri الجرابي الوحيد من نوعه.



القوارض التي ركبت البحار[**]

ومن بين اكتشافاتنا الأكثر أهمية في وادي تنكويريريكا، أحفورة أقدم قارض عُرف في أمريكا الجنوبية. هذه اللقية تعطي دليلا قويا للجدل الدائر حول منشأ خنازير الماء والشينشيليات الحالية وهذه المخلوقات المعروفة برتيبة قوارض **كافيومورفا**[2] Caviomorpha، وأقرباؤها المباشرون. تؤلّف سلالة قوارض أمريكا الجنوبية الأكثر قدما (وهي متميّزة من سلالة القوارض الأحدث المكونة من الجرذان والفئران والمخلوقات ذات

(*) Cast of Characters

(**) Seafaring Rodents

(1) رتبة في الثدييات تتضمّن بواكر السعادين والنسانيس والقردة والإنسان.

(2) رتيبة من القوارض عاشت في أمريكا الجنوبية من عصر الأوليكوسين حتى العصر الحالي (التحرير)

مهاجرون أفارقة[*]

لم تكن نسانيس العالم الجديد ومجموعة قوارض «الكافيومورفا» (تشمل في الوقت الحاضر خنازير الماء والشينشيليات وأقرباءها) من سكان أمريكا الجنوبية الأصليين، ولكنها وصلت قبل 25 مليون سنة عندما كانت أمريكا الجنوبية جزيرة. وقد جادل بعض الباحثين في أن أسلاف الحيوانات عبرت الممر المائي الأقصر نسبيا، أي من أمريكا الشمالية؛ غير أن الأحافير الجديدة المكتشفة في أواسط تشيلي دلّت بوضوح على أنّ حيوانات المجموعتين أكثر انتماء إلى أسلاف في إفريقيا. ومن المحتمل أنّ الحيوانات الأصلية التي استعمرت أمريكا الجنوبية قد هاجرت من إفريقيا إلى أمريكا الجنوبية على جزر عائمة من النباتات، أو بآلية انتشار أخرى نادرة لا نعتقد أنه يمكن تعرفها.



نسناس:
شلسيبوس كاراسكوانسيس[1]

جمجمة صغيرة (طولها 5 سم وعمرها 20 مليون سنة) لنسناس صغير يزن كيلوغراما واحدا أو أقل، ويمكن أن يشابه القرد الأمريكي الصغير (*في اليسار*).

قارض:
نوع جديد *لم يصنَّف بعد*

جزء من فك (طوله 2 سم) لقارض عمره 32 مليون سنة، وهو أحد أقدم اثنين من أحافير القوارض التي وجدت في أمريكا الجنوبية، وهو قد يشابه الأكوتي agouti الحالي (حيوان بحجم الأرنب قصير الشعر والأذنين) (*في اليسار*).

القرابة التي وصلت من الشمال (أمريكا الشمالية) قبل نحو 3.5 مليون سنة عندما اتصلت الأمريكتان لأول مرة ببرزخ پنما) ويتفق علماء الأحافير على أنّ قوارض «الكافيومورفا» الأولى قد وصلت في وقت ما في أثناء الفترة الزمنية الطويلة (من 55 مليون إلى 25 مليون سنة)، بينما كانت أمريكا الجنوبية جزيرة. ولقد لمحت أحافير «الكافيومورفا» الأحدث إلى أنّ الأسلاف أتت من إفريقيا. غير أنّ الكثير من الباحثين وجدوا أنّه من الأسهل أن نتصوَّر أنّ القوارض المهاجرة قامت برحلة أقصر، أي من أمريكا الشمالية. وربّما عن طريق سلسلة من الجزر الكاريبية.

وللمساعدة على حل هذا النقاش، قارنّا التفاصيل التشريحية لحيوان التنكويريريكا ببقايا القوارض التي وجدت في أمكنة أخرى من العالم. وقد جاءت المعلومات الأكثر دلالة من شكل الأسنان الصغيرة التي لاتزال في أمكنتها على الفك السفلي (الفك العلوي والأضراس - الطواحن - لم يعثر عليها حتى الآن). ويدل ذلك الشكل على أنّ أضراس الفك العلوي لحيوان التنكويريريكا تحوي خمس حدبات متميّزة على سطحها ـ كما هي الحال في أضراس الفك العلوي في القوارض الإفريقية التي عثر عليها في الفترة الزمنية نفسها. وبالمقابل فإنّ الأضراس العليا لأنواع القوارض القديمة في أمريكا الشمالية بها أربع حدبات فقط. وتوحي هذه المقارنات بوجود علاقة وثيقة وقوية بين قارض التنكويريريكا وحيوانات إفريقيا. ويعد عدم وجود أسلاف حيوانات «الكافيومورفا» في طبقات الأحافير الأقدم في أمريكا الشمالية، الذي يبدو مقبولا، دليلا داعما أيضا لنظرية المنشأ الإفريقي لهذه الحيوانات.

يبدو أن مستعمرة «الكافيومورفا» الأصلية قد ارتحلت من إفريقيا إلى أمريكا الجنوبية على أجزاء من جذوع الأشجار أو أطواف من كتل الأخشاب ـ للاطلاع على أفضل تخمينات العلماء عن كيفية ارتحال حيوانات ونباتات استثنائية متنوعة إلى الكثير من المناطق المنعزلة جغرافيا [انظر: «أسرار حقب *الحياة الوسطى* في مدغشقر»، **العلوم**، العددان 5/4 (2003)، ص 56]. قد تكون فكرة الرحلة عبر المحيط، التي يصعب تصديقها، غير محتملة الحدوث، ولكنّها أكثر احتمالا في إطار البيئة العالمية قبل نحو 32 مليون سنة. وفي ذلك الزمن، كان عرض المحيط الأطلسي الجنوبي في أضيق نقاطه نحو 1400 كم ـ أي نصف عرضه الحالي ـ وكانت التيارات البحرية من الشرق نحو الغرب في المناطق المدارية قوية بصورة عرضية.

ربّما تكون هذه الظروف قد سمحت برحلة مدتها قرابة أسبوعين. ويمكن أن تكون الحيوانات قد دخلت خلالها في سبات (سكون وأيض منخفض إلى أبعد الحدود خلال أوقات الإجهاد). إضافة إلى ذلك كان مستوى سطح البحر في ذلك الزمن ينخفض (بسبب تشكّل مسطحات جليدية على القطب الجنوبي وما جاوره)، ومن ثم، يمكن أن تكون جزيرة بركانية أو أكثر قد شكّلت نقاط ارتكاز، وهي الآن مغمورة، ممّا جعل عملية العبور أكثر سهولة.

أنظمة بيئية واعدة[**]

باستخدام طريقة تحديد أعمار جديدة ودقيقة جدا تعتمد على تحليل كميات ضئيلة من غاز الأركون المحتبسة داخل بلورات الصخور المحتوية على الأحافير، حدّدنا أنّ قوارض وثدييات «تنكويريريكا» الأخرى تعود إلى ما قبل 33 مليون إلى 31.5 مليون سنة

(*) African Immigrants
(**) Emerging Ecosystems
(1) Chilecebus carrascoensis

ويشير نمو مسطحات جليد القارة الجنوبية وظواهر أخرى إلى أنّ المناخ العالمي قد صار أكثر برودة وجفافا. فإذا عرفنا أن تغيّرا مناخيا رئيسيا قد حدث تماما عندما كانت ثدييات تنكويريريكا تزدهر، فقد دفعنا ذلك إلى تحرّي ما إذا كانت الحيوانات وبيئاتها قد تجاوبت مع تلك التغيّرات.

لقد سمحت لنا قرائن متعدّدة من الأدلة غير المباشرة بإعادة بناء موطن ثدييات التنكويريريكا، مع أننا لم نجد قط أحافير نباتية من الصخور نفسها. وكشف التحليل المبكر لأسنانها عن أنّ حيوانات «التنكويريريكا» لا بدّ وأنّها عاشت في نظام بيئي مختلف تماما عن النظام الذي عاشت فيه أسلافها المباشرة. ومعظم ثدييات أمريكا الجنوبية الأقدم والمعروفة في الفترة الواقعة بين 65 و 34 مليون سنة حيوانات من آكلات العشب كانت ترعى النباتات الغابية الخضراء النموذجية، مثل أوراق الأشجار والأعشاب (في الواقع، تُؤكّد الأحافير النباتية أنّ الغابات المورقة كانت تُغطي على ما يبدو مساحات واسعة من أمريكا الجنوبية في أثناء تلك الفترة). فالثدييات التي تأكل هذه الأغذية الطرية، بما فيها البشر، تتمتّع **بأسنان قصيرة التاج**[1] مع غطاء رقيق من المينا الواقي يغطي السن إلى الخط الفاصل مع اللثة.

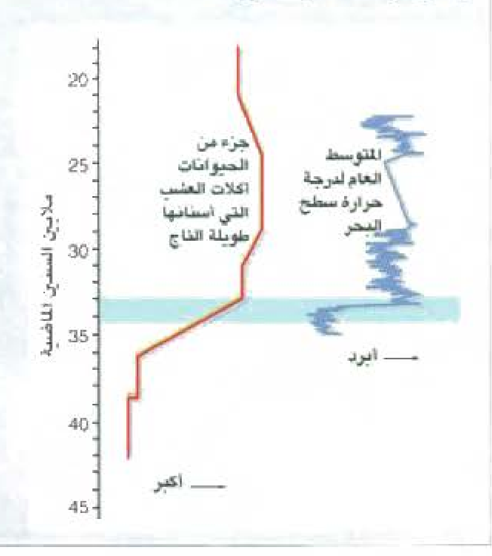
وعلى النقيض من ذلك، تمتلك معظم حيوانات «التنكويريريكا» العاشبة أسنانا ذات تاج طويل جدا مع مينا يمتد ما بعد الخط الفاصل مع اللثة إلى نهاية الجذر تقريبا. وهذه حالة معروفة باسم **الأسنان الطويلة التاج** hypsodonty. ويجعل مينا السن الإضافي (مينا السن أقسى من عاج السن في باطنه) الأسنان طويلة التاج أكثر مقاومة للاهتراء من **الأسنان القصيرة التاج** brachyodonty. وبكل تأكيد تقريبا طوّرت حيوانات «التنكويريريكا» العاشبة مثل هذه الأسنان استجابة للجسيمات الساحجة الموجودة ضمن الأغذية التي كانت تأكلها، كما فعلت الماشية والظباء والخيول والحيوانات الأخرى التي تأكل العشب الرملي في المروج المفتوحة والسافانا في أمكنة أخرى من العالم. ومن الجدير بالملاحظة أيضا أنّ أسنان ثلثي جميع أنواع حيوانات «التنكويريريكا» كانت ذات تاج طويل. وتزداد نسبة الكائنات التي تيجان أسنانها طويلة مقارنة بالأنماط السنية الأخرى، بازدياد نسبة الموطن المفتوح. ثم إن نسبة أسنان حيوانات «التنكويريريكا» ذات التيجان الطويلة قد تجاوزت حتى المستوى الملاحظ لدى الثدييات الحالية في المواطن المفتوحة مثل «**السهول العظمى**» Great Plains في أواسط أمريكا الشمالية.

تقضي هذه النتائج أنّ العواشب في «تنكويريريكا» كانت ترعى في مروج العشب المفتوحة وليس في الغابات، ولكن الأسنان ليست هي الدليل الوحيد في هذا الاستنتاج. فقد زودنا خرّيجنا السابق في الدراسات العليا <R. كروفت> [وهو حاليا أستاذ في جامعة كيس وسترن ريزرف] باستنتاجين مستقلين آخرين حول كمية الأمطار السنوية والغطاء النباتي اللذين كانا سائدين في النظام البيئي القديم في وادي «تنكويريريكا». فقد كشفت التحاليل الإحصائية (تحاليل سينوگرام والموطن الكبير) لعدد من الأنواع مصنفة حسب أحجامها في مجموعات، أنّ حيوانات «التنكويريريكا» تتشابه، إلى حد بعيد، مع المجموع الحيواني الحالي الذي يعيش في سهول العشب الجاف مع رقع من الغابات مثل أجزاء السافانا في إفريقيا أو مواطن «كاتينگاز» Caatingas (منطقة شمال شرق البرازيل) و«شاكو» Chaco (منطقة شمال شرق الأرجنتين) في أمريكا الجنوبية.

وبشيء من الاستغراب، قوبل استنتاجنا بأنّ موطن «تنكويريريكا» القديم كان مفتوحا

أسنان «تخبر» بكل شيء[*]

تمتلك معظم أحافير الحيوانات العاشبة المكتشفة في وادي تنكويريريكا بتشيلي، التي عمرها 32 مليون سنة، أضراسا طويلة التاج Hypsodont تشابه أضراس المواشي (الأبقار والأغنام...) الحالية التي تستخدمها في طحن النباتات الليفية الرملية. وتشير هذه الأضراس المتخصصة إلى أنّ منطقة تنكويريريكا كانت أرضا عشبية جافة عندما كانت تلك الحيوانات تعيش فيها. وفي زمن أبكر، كانت معظم أمريكا الجنوبية مغطاة بغابات كثيفة وكانت نسبة الأنواع العاشبة فيها ذات الأضراس الطويلة التاج أقل (*الخط الأحمر في الرسم البياني*). إنّ تغيّر المناخ (*الخط الأزرق القاتم*) إلى مناخ أبرد، ومن ثم أكثر جفافا، قبل نحو 34 مليون سنة (*الخط الأفقي العريض الأزرق الفاتح*) يمكن أن يفسّر تجفاف الغابات المورقة.



أسنان طويلة التاج

يوضح الفك الأيمن المكسور لعاشب تنكويريريكي بحجم الخروف، الأسنان المقاومة للاهتراء النموذجية للحيوانات التي ترعى في مروج العشب. تمتد التيجان المغطاة بطبقة واقية من المينا بعيدا تحت اللثة نحو نهايات جذور الأسنان ـ مما يؤمّن مواد إضافية لتعويض الاهتراء في أثناء نمو السن.



أسنان قصيرة التاج

يوضح الفك الأيمن السفلي لعاشب تشيلي قديم لم يسمّ بعد، أنّ طبقة المينا الواقية تغطّي فقط أجزاء التيجان التي تعلو خط اللثة. ومثل هذه الأسنان لا تلائم النظام الغذائي المحتوي على الرمل؛ فهي عادة لحيوانات ترعى الأوراق أو الأعشاب الطرية.

(*) The fossil mammals of the Chilean Andes

(1) ذات تاج سني قصير (التحرير)

أحافير الثدييات في الآنديز التشيلية(*)

إن ما اعطى هذه الأحافير كل هذه الأهمية هو ما قدمته من وسائل متقدمة لفهم التاريخ الجيولوجي في هذا القطاع من جبال الأنديز. فالعمر الأحدث غير المتوقّع للثدييات القديمة أبطل الافتراضات السائدة حول عمر صخورها المضيفة، مشيرا إلى أنّ ذلك الجزء من الأنديز قد تشكّل على الأقل بعد 70 مليون سنة ممّا كان يُظنّ سابقا. وكان يعتقد لمدة طويلة أنّ عمر معظم الصخور التي تشكل العمود الفقري للسلسلة الرئيسية لأواسط جبال الأنديز التشيلية، التي سماها ووصفها للمرة الأولى «تشارلز داروين» يعود على الأقل إلى 100 مليون سنة؛ كما أنّ المراحل الأولى لرفعها كانت قديمة بصورة مماثلة. وقد مكّن تحديد عمر الرواسب المحتوية على الأحافير فريقَنا من أن يحسب، لأول مرة وبدقة، الزمن الذي بدأ فيه هذا الجزء من جبال الأنديز بالارتفاع والتشكل: بين ما قبل 15 مليون و 18 مليون سنة. استمر الرفع على فترات، وما زال يحدث حتى الآن. ومن الواضح حاليا أنّ الأحواض الواسعة المملوءة بالرواسب قد تشكلت في أثناء المراحل البركانية من التاريخ الجيولوجي للسلسلة الجبلية، وذلك بتشكيل الأنظمة البيئية القديمة في المنطقة، الفريدة من نوعها، وتوفير الوسيلة الكفيلة لحفظ سجل الثدييات القديمة المثير.



تعد الطبقات الحاملة للأحافير التي دُفعت نحو الأعلى وأصبحت شبه شاقولية تقريبا، دليلا مثيرا على القوى التكتونية التي ضغطت أواسط تشيلي عبر ملايين السنين. وتقع هذه المنحدرات الشديدة بالقرب من بحيرة لاجا Lake Laja الواقعة على بعد 300 كم إلى الجنوب من وادي تنكويريريكا.

وجافا نسبيا ويحتوي على أعشاب وفيرة، ذلك لأنّ جميع الأدلة السابقة تشير إلى أنّ السهول العشبية المفتوحة الأولى (الأقدم) على القارات الأخرى لم تظهر إلاّ قبل نحو 18 مليون سنة. وظهور سهول تنكويريريكا العشبية قبل ذلك بنحو 15 مليون سنة قد يكون نجم عن اتجاه المناخ العالمي ليصبح جافا وباردا في ذلك الزمن - وربّما ازداد الوضع حدة بسبب ظاهرة ظل المطر الناتجة من ارتفاع جبال الأنديز. ويبدو أن السهول العشبية كانت أفضل تلاؤما مع المناخ الأكثر برودة وجفافا من الغابات المورقة التي عاشت في أثناء آلاف السنين السابقة وحتى الآن. ومع ذلك، فإنّ الاشتباه في أنّ السهول العشبية نتجت من التبريد العالمي يحتاج إلى إنعام أكثر للنظر، ويشكّل اختبار إضافي للعلاقة السببية المباشرة وسيلة للبحث في المستقبل.

لا توجد نسانيس هنا وهناك(**)

بعد أن تم اكتشاف مثل هذا الكنز الدفين والغني بالمعلومات الأحفورية والبيئية في مواقع متعدّدة من وادي «تنكويريريكا»، بدأنا نفكر فيما إذا كان هذا الجزء من جبال الأنديز «ضربة حظ» أحفورية. وبعد ذلك وبسرعة قادنا عائق غير متوقّع إلى الجواب. كانت إعادة بناء الطريق المؤدية إلى وادي «تنكويريريكا» في ربيع عام 1994 بطيئة على نحو استثنائي، ولكنّنا لم نعلم شيئا عن هذا العائق حتى وصولنا إلى مسرح الحدث. لقد تحولنا من الإحباط إلى اغتنام الفرصة، وبدأنا بالاستكشاف خارج الوادي.

فقد استكشفنا أودية رئيسية أخرى تُبدي التكشّفات نفسها من الصخور الرسوبية البركانية المنشأ التي تغطي آلاف الكيلومترات المربّعة من المناطق الجبلية. لقد حدّدنا خلال السنوات المتتالية من العمل الحقلي أنّ أحافير الثدييات لم تكن في الحقيقة مقتصرة على وادي «تنكويريريكا» وأنّ سيل الحمم البركانية الذي أغرق المروج القديمة لم يكن كارثة منعزلة ولمرة واحدة. وفي الواقع، إنّ أحداثا مدمّرة كهذه حصلت بصورة متكرّرة إذا نظر إليها عبر ملايين السنين. وفي كل حادثة، تُدفن الرواسب الأقدم تحت طبقات كثيرة من المواد البركانية الاندفاعية الإضافية (وما تحويه من عظام) بصورة دائمة إلى أعماق أكبر. وفي النهاية فإن ثخانة هذا التراكم المتطبّق من الرواسب (وتحولت إلى صخور) مع الحمم البركانية (اللابات) تربو على 3 كم. وفيما بعد ضغط تقارب صفائح القشرة الأرضية (التكتونية) هذا الركام الصلب بشدة نحو الأعلى.

وإن تحاليلنا المستمرّة للمجموعات الحيوانية المتعدّدة التي يراوح عمرها بين 10 ملايين و 40 مليون سنة، تكشف عن أفكار جديدة حول تاريخ المنطقة. وأحد مكتشفاتنا الحديثة والأكثر أهمية، من موقع يبعد 100كم شمال منطقة «تنكويريريكا» في حوض تصريف نهر كاشابوال Cachapoal River، كان الجمجمة الأكثر كمالا حتى الآن لنسناس مبكر من العالم الجديد. وهذه الجمجمة التي يبلغ طولها 5سم، مع ما تحمله من **أوقاب** وأسنان كاملة محفوظة حفظا جيدا في الفك العلوي، تنتمي إلى نسناس صغير يزن على الأكثر نحو 1 كغ. وهذا المخلوق، الذي دعي شيليسيباس كارّاسكوانسيس Chilecebus carrascoensis، كان يشابه نسانيس العالم الجديد الحالية، مثل نسناس المارموسيت marmoset

(*) The fossil mammals of the Chilean Andes
(**) No Monkeying Around
(1) ج: وقْب eye socket وهو نُقْرة العين (التحرير)



جماجم العواشب، كما شوهدت أول مرة في الحقل، حُفظت في أرضية خشنة متحجرة مكونة من رماد وطين من اندفاعات بركانية قديمة. وحتى قبل إخراج العظام من الصخر، حدد الباحثون العينتين كنوعين من الحيوانات الحافرية العاشبة المعروفة بالحافريات القديمة notoungulates.



ونُلاحظ بصورة خاصة على العينة (اليمنى) الأسنان الطويلة التاج المميزة للحيوانات العاشبة. أمّا الجمجمة الأخرى التي تعود لحيوان حافري آخر آكل للأوراق الطرية، يدعى نوتوپيتسين notopithecine، فقد اكتشفت حديثا بالقرب من نهر تينو Teno.

والتامارين tamarin وكما حدث مع قوارض «الكافيمورفا». فالخبراء يناقشون منذ مدة طويلة فيما إذا كانت نسانيس العالم الجديد قد نشأت في أمريكا الشمالية أو في إفريقيا ولكن التفصيلات التشريحية لجمجمة النسناس «شيليسيبياس» وأسنانه تنم عن إرثه المشترك مع مجموعة الرئيسات التي نشأت في إفريقيا. ومثل ما حصل مع قوارض «الكافيمورفا» يبدو أنّ أسلاف النسناس «شيليسيبياس» قامت بطريقة ما بعبور المحيط الأطلسي قادمة من إفريقيا.

بدءا من المجموع الحيواني في منطقة «تنگويريريكا» وانتهاء بالنسناس «شيليسيبياس» والمكتشفات المستمرة الأخرى عبر أواسط تشيلي، تُبرهن الرواسب البركانية، التي أُهملت في السابق عند التفتيش عن الأحافير، أنّها تحوي عظاما محفوظة حفظا جيدا، وأنّها تتضمّن الآن السجل الرئيسي لتطوّر ثدييات أمريكا الجنوبية. ومع مر السنين، توصلنا إلى إدراك واضح لمظهر الصخور الواعدة، حتى إنّنا كنا قادرين أحيانا على تعرفها من عدة كيلومترات. لقد حصلنا على هذه الأحافير بجهود كبيرة، ومع ذلك فقد بُذلت هذه الجهود لتخطّي صعاب التضاريس الشديدة الانحدار والمسافات البعيدة للكثير من المواقع. وتقع بعض المواقع ضمن بضعة كيلومترات من الطرقات الحصوية والممرّات الرملية، ولا يمكن الوصول إلى المعظم الآخر إلاّ بعد سير طويل على الأقدام أو ركوبا على الخيول أو حتى باستخدام الطوافة (الهليكوبتر) ونشير هنا، مازحين، إلى «مقولة «أندي»» (سمّيت كذلك تكريما لـ«أندره وايس») التي تذكر أنّ الصعوبة في الوصول إلى موقع تكون متناسبة مع كمية ونوعية الأحافير التي سوف نجدها.

إن الأحافير التي اكتشفت في جبال الأنديز التشيلية في طبقات يعود عمرها إلى حقب السينوزوي، تساعد على توضيح تطوّر الثدييات. إضافة إلى توضيح التحوّلات البينية في أمريكا الجنوبية، وهي القارة التي يمثّل انعزالها المديد على شكل جزيرة اختبارا طبيعيا رائعا لدراسة الظواهر التطورية الكبيرة. ■

المؤلفون

John J. Flynn - André R. Wyss - Rwynaldo Charrier

في العشرين سنة الماضية، تحرّى المؤلفون معا التاريخ الأحفوري المدفون في جبال الأنديز التشيلية. «فلاين» هو رئيس وأمين متحف فريك Frick التابع لقسم علم الأحافير في متحف التاريخ الطبيعي الأمريكي بمدينة نيويورك وعميد مدرسة الدراسات العليا الجديدة التابعة لهذا المتحف. «وايس» أستاذ علوم الأرض في جامعة كاليفورنيا. أمّا «شاريير» فهو أستاذ الجيولوجيا في جامعة تشيلي بسانتياگو. *ويشكر المؤلفون معدّي الأحافير المتخصصين لدعمهم الاستثنائي لهذا البحث. كما يشكرون المتحف الوطني للتاريخ الطبيعي في سانتياگو والمجلس الوطني للنصب التذكارية في تشيلي ومؤسسة العلوم الوطنية في الولايات المتحدة وإدارة الطيران والفضاء الأمريكية (ناسا) واللجنة الوطنية للأبحاث التقانية والعلمية في تشيلي.*

مراجع للاستزادة

Splendid Isolation: The Curious History of South American Mammals. George Gaylord Simpson. Yale University Press, 1980.

Cenozoic Environmental Change in South America as Indicated by Mammalian Body Size Distributions (Cenograms). Darin A. Croft in *Diversity and Distributions*, Vol. 7, No. 6, pages 271-287; November 2001.

The Tinguiririca Fauna, Chile: Biochronology, Paleoecology, Biogeography, and a New Earliest Oligocene South American Land Mammal "Age." J. J. Flynn, A. R. Wyss, D. A. Croft and R. Charrier in *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Vol. 195, No. 3/4, pages 229-259; June 15, 2003.

For more details about the mammal lineages that inhabited South America when it became geographically isolated, visit **www.dcpaleo.org/Research/SAMammals/SAMammals.html**

Scientific American, May 2007

الحدود المنطقية والرياضياتية[*]



كانت التحديات التي واجهت علماء الرياضيات عبر التاريخ عديدة، بل إن بعضها تطلب قرونا من الجهد للتغلب عليها. ويرى <P. J.> دولاهاي[**] أن اكتشاف استحالات أساسية وإثباتها يعدّان جزءا من أبرز عناصر التقدم.

متى تم اكتشاف وجود حدود رياضياتية؟

منذ القِدَم. فمن أبرز النتائج التي توصل إليها قدماء الرياضياتيين الإغريق، نحو القرن الخامس قبل الميلاد، اكتشاف أن $\sqrt{2}$ أصم[1]. وهذا يعني أنه لا يمكن كتابة $\sqrt{2}$ على شكل نسبة عددين صحيحين. إنها نتيجة بسيطة البرهان (*انظر المؤطر في الصفحة المقابلة*)، وهي تكافئ القول: إن قطر المربع لا يمكن قياسه بضلع المربع كوحدة طول ـ أي إن وحدة الطول المحددة بضلع المربع لا تسمح بالتعبير عن طول القطر كنسبة عددين صحيحين. في حين كان الاعتقاد السائد يعتبر أن جميع المقادير الهندسية أو الفيزيائية تقبل القياس. ولذا كان اكتشاف أن $\sqrt{2}$ عدد أصم (غير نسبي) بمثابة صدمة.

هل لمحدودية سلطة الأعداد الصحيحة صلة بمسألة تربيع الدائرة التي وضعها أيضا قدماء الإغريق؟

هناك صلة. لكنها صلة ذات طابع رجعي لا أكثر، وذلك عندما ننظر للمسألة بمنظار اليوم. لنذكّر أن مسألة تربيع الدائرة التي طرحها <أناكساگور> على نفسه، في القرن الخامس قبل الميلاد، كانت تتمثّل في إنشاء مربع، باستعمال المسطرة والفرجار، مساحته تساوي مساحة قرص تحيط به دائرة معلومة. وبعبارة أخرى، يتعلق الأمر بإنشاء مربع مكتفين باستخدام فرجار ومسطرة غير مُدرَّجة، أي برسم مستقيمات بالمسطرة وبنقل الأطوال بواسطة فتحة رأسي الفرجار. وهكذا تُرَدُّ مسألة تربيع الدائرة إلى الانطلاق من طول معلوم بوصفه وحدة (وهو نصف قطر الدائرة) وإنشاء طول يساوي $\sqrt{\pi}$ وحدة (وهو طول ضلع المربع الذي تساوي مساحته مساحة الدائرة). لقد ظل الجواب النهائي عن هذا السؤال عالقا أكثر من 20 قرنا؛ ذلك أن الرياضياتي الألماني <F. فون ليندمان> قدّم الإجابة عام 1882، وكانت الإجابة بالنفي: تربيع الدائرة بالمسطرة والفرجار مستحيل. وقد جاء الجواب عن هذه المسألة الهندسية عام 1837، بعد أن تمّ إدراك أن الإنشاءات بالمسطرة والفرجار متصلة بسلسلة من العمليات الجبرية الأولية: الجمع والطرح والضرب والقسمة واستخراج الجذر التربيعي. ومن ثم اتضح أنه إذا كان الطول $\sqrt{\pi}$ قابلا للإنشاء بالمسطرة والفرجار فإن π حل لمعادلة جبرية معاملاتها أعداد صحيحة (مثل المعادلة: $11x^{7} - 2x^{2} - 3 = 0$). غير أن ليندمان تمكّن من إثبات أن π ليس حلا لأية معادلة جبرية معاملاتها أعداد صحيحة (نقول عن π إنه **متسام** transcendant وليس **جبريا** algeb). وهذا يؤدي إلى استحالة تربيع الدائرة. ونلاحظ هنا أن لدينا نتيجة طبيعتها مماثلة لتلك المتعلقة بصمم $\sqrt{2}$. فكما تبيّن لنا أنه من الخطأ القول إن جميع الأعداد **مُنْطَقة**[1] (أي تكتب على شكل نسبة عددين صحيحين)، فإنه من الخطأ القول أيضا إن كل عدد يمكن كتابته بصيغة حلّ لمعادلة جبرية معاملاتها صحيحة.

إن الموضوعة الخامسة لإقليدس، وهي مسلّمة المتوازيات، حيّرت الرياضياتيين خلال زمن طويل. فهل ظهرت هنا أيضا حدودٌ لا يمكن تجاوزها؟

لنذكّر بما جرى: كان إقليدس قد نصّ في كتابه «الأصول»[3] *The Elements* على مسلّمات الهندسة الأساسية. وكانت إحدى هذه المسلّمات تكافئ القول إنه «من نقطة مفروضة خارج مستقيم مفروض يمر مستقيم واحد ـ وواحد فقط ـ يمر من موازٍ للمستقيم المفروض». والغريب، بالنسبة إليّ على الأقل، أن الرياضياتيين كانوا يعتقدون بأن هذه المسلّمة ليست مستقلة، وأنه ينبغي استنتاجها من باقي المسلّمات. وهكذا قضى الرياضياتيون نحو عشرين قرنا محاولين البرهان على مسلّمة المتوازيات إلى أن دبّ

(*) Les limites logiques et mathematiques عنوان مقالة ألقاها <P. دولاهاي> في قصر الاكتشاف بباريس، وقد طُرحت عليه الأسئلة الواردة في هذه المقالة من قبل مجلة *Pour La Science*، ونشرت في العدد 352 من هذه المجلة وهي الأخت الفرنسية لـ **العلوم**.

انظر أيضا: «مواجهة الحدود المنطقية للعلم»، **العلوم**، العدد 2 (1997)، ص 4.

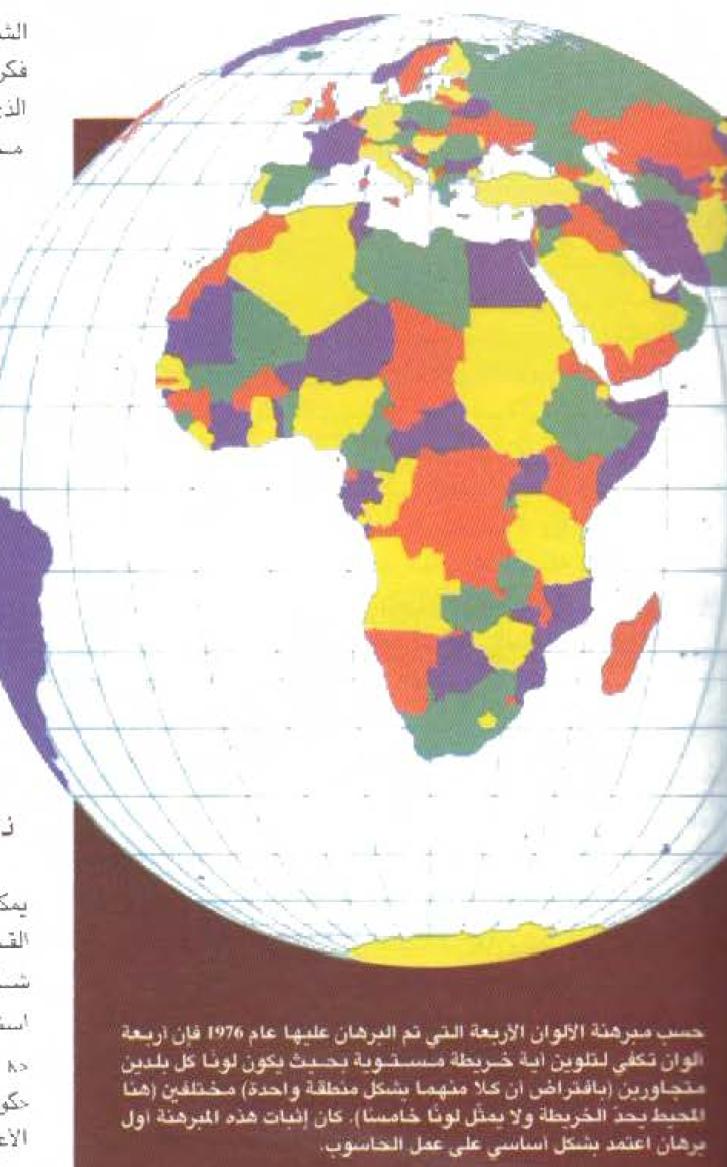
(**) <P. دولاهاي> أستاذ المعلوماتية في جامعة ليل Lille الفرنسية ويجري أبحاثه في مختبر المعلوماتية الأساسية في مدينة ليل.

(1) irrational أو غير نسبي؛ rational مُنْطَق أو نسبي.

(2) أو نسبية.

(3) هو مؤلف شهير وضعه إقليدس في الهندسة، أسس من خلاله ما يعرف اليوم بالهندسة الإقليدية. (التحرير)

الشك خلال القرن التاسع عشر في إمكانية تحقيق هذا الهدف. وكانت فكرة البرهان على هذه الاستحالة لافتة لأنها أوحت بمفهوم النموذج الذي كان بالغ الأهمية في المنطق الرياضياتي. ويتعلق الأمر باختيار مجموعة **كينونات** (رياضياتية) entities، بعضها يسمى نقاطا وبعضها الآخر يسمى مستقيمات؛ ثم اختيار علاقات بين تلك الكائنات الموافقة لمسلّمات الهندسة. وإذا أنشأنا مثل هذا «النموذج» الذي تكون فيه جميع مسلّمات الهندسة محققة، باستثناء مسلّمة التوازيات، وبرهنا على أن هذا النموذج **لا يؤدي إلى تناقضات**، فإننا نكون بذلك قد أثبتنا بأن مسلّمة التوازيات مستقلة عن المسلّمات الأخرى. كان «E. بلترامي» عام 1868 أول من قدم مثل هذا الإنشاء. وهو يتمثّل في اعتبار (سطح) كرة وتسمية «نقطة» كل ثنائية من نقطتين متقابلتين قطريا على سطح هذه الكرة، وتسمية «مستقيم» كل دائرة لها قطر أعظمي على هذا السطح. يمكننا عندئذ أن نرى أن جميع مسلّمات إقليدس محققة على هذه الكرة باستثناء مسلّمة التوازيات: لا يمكن رسم «مستقيم» يمر بـ«نقطة» خارج «مستقيم» D ويوازيه، أي لا يلتقي بـD. لقد كان هذا الاكتشاف، شأنه شأن اكتشاف الاستحالات الأخرى، مثمرا لأنه ولّد هندسات غير إقليدية.


حسب مبرهنة الألوان الأربعة التي تم البرهان عليها عام 1976 فإن أربعة ألوان تكفي لتلوين أية خريطة مستوية بحيث يكون لونا كل بلدين متجاورين (بافتراض أن كلا منهما يشكل منطقة واحدة) مختلفين (هنا المحيط يحدّ الخريطة ولا يمثل لونا خامسا). كان إثبات هذه المبرهنة أول برهان اعتمد بشكل أساسي على عمل الحاسوب.

هل توجد حدود لا يمكن للاستدلال الرياضياتي ذاته أن يتجاوزها؟

يمكن أن يمسّ المنطق الرياضياتي النظريات الرياضياتية ذاتها، أي القضايا التي يمكن البرهان عليها انطلاقا من بعض المسلّمات. وهذا شأن تطور المنطق الرياضياتي. وفي هذا السياق هناك نتيجة استحالة شهيرة هي **اللاحسمية** the undecidedness[1]، التي توصل إليها «K. كوديل»[2] ما بين عامي 1930 و 1931. كان عالم المنطق النمساوي «كوديل» قد برهن أنه إذا أخذنا مجموعة من المسلّمات تتيح تطوير حساب الأعداد الصحيحة فإنه توجد خواص صحيحة تتعلق بهذه الأعداد ستكون لاحسمية، أي خواص صحيحة إلا أنه من المستحيل إثباتها اعتمادا على مجموعة المسلّمات التي انطلقنا منها. لقد صادفتنا حالة مماثلة في الهندسة: إن مسلّمة التوازيات مسلّمة لاحسمية. إذ إننا نستطيع إضافة هذه المسلّمة، أو إضافة نقيضها، إلى مجموعة المسلّمات الهندسية من دون أن يترتب على ذلك تناقضات. والواقع أن نظرية «كوديل» أقوى من ذلك: فهي تنصّ على أن كل نظام مُسلّمي متين بحيث يمكنه تطوير الحساب الأولي، فإن هذا النظام يحتوي حتما على عبارة صحيحة لكنها لاحسمية؛ وحتى إن رفعت هذه العبارة إلى مرتبة المسلّمة، فإن النظام المُسلّمي المحصل عليه بهذه الطريقة سيخضع بدوره لحكم نظرية «كوديل»، حيث ستظهر مجددا عبارة أخرى صحيحة، لكنها لاحسمية (يوضح برهان «كوديل» كيفية إنشاء هذه العبارة الجديدة) وهكذا دواليك. ومن ثمّ يتبيّن أنه لا يوجد نظام مُسلّمي كامل. إنها نتيجة مُحدِّدة محيِّرة جدا، وقد تمت مناقشتها كثيرا. وهي نتيجة مركزية في كل تفكير حول طبيعة الرياضيات

البرهان على أن $\sqrt{2}$ عدد أصم (غير نسبي)[*]

لإثبات أن $\sqrt{2}$ لا يكتب على شكل نسبة عددين صحيحين، يمكننا **الاستدلال بالخلف** proof by the absurd: نفترض أن هذا العدد يكتب على الشكل p/q، حيث p و q عددان صحيحان، ثم نبرهن على أن ذلك يؤدي إلى تناقض. نستطيع اختيار p و q بحيث لا يكون الاثنان زوجيين معا (وإلا اختصرنا 2 في الكسر). نربّع طرفي المساواة المفترضة، وهي $\sqrt{2} = p/q$، فنحصل على المساواة $p^2 = 2q^2$ التي نستنتج منها أن p زوجي (لأن مربع عدد فردي يساوي عددا فرديا). يسمح ذلك بكتابة $p = 2p'$، حيث p' عدد صحيح. وهكذا نحصل بعد التعويض على $4p'^2 = 2q^2$، أي $q^2 = 2p'^2$، ومن ثمّ نستنتج أن q زوجي أيضا. وهذا تناقض لأننا انطلقنا من كون p و q ليسا زوجيين في آن واحد. وعليه فالفرضية الأولى القائلة بأن $\sqrt{2}$ يكتب على الشكل p/q، هي فرضية خاطئة.

(*) Prouver l'irrationalité de √2.

(1) indécidabilité، أو «عدم قابلية البت».

(2) انظر: «كوديل وحدود المنطق»، **العلوم**، العدد 10 (2001)، ص 40.

ومع ذلك كانت هناك معوقات في الرياضيات قاومت طويلا، لكنها استسلمت في نهاية المطاف. هل بالإمكان أن تعطينا أمثلة على ذلك؟

هناك في جميع مراحل تاريخ الرياضيات، **مُخمَّنات** conjectures ـ وهي خواص تبدو صحيحة ومهمة، غير أننا لا نستطيع البرهان عليها. وقد قاوم بعضها عدة قرون قبل أن يتم البرهان عليها، في حين ظل بعضها الآخر يتحدى الرياضياتيين إلى يومنا هذا. رأينا مثلا على ذلك في العدد π وتربيع الدائرة: كان التخمين في مطلع القرن التاسع عشر يرى أن العدد π عدد **متسام** transcendant، ومن ثمّ فتربيع الدائرة قضية مستحيلة. وهذا ما أثبته فعلا <ليندمان> بعد نصف قرن، وكان ذلك عام 1882. وهناك مثال آخر يتعلق بمخمّنة الأعداد الأولية تعطي تقديرا لندرة الأعداد الأولية (وهي الأعداد التي

تمثّل نظرية گوديل نتيجة مُحدِّدة محيّرة جدا، وهي نتيجة مركزية في كل تفكير يتعلق بطبيعة الرياضيات.

لا تقبل القسمة إلا على 1 أو على ذاتها) عندما تتزايد (هذه الأعداد) في الكبر. وكان <گاوس> قد تنبأ بالنتيجة عام 1792، لكن البرهان عليها أتى بعد أكثر من قرن (كان ذلك عام 1896) على أيدي <J. آدامار> و <C. دي لاڤالي پوسين> (كلٌّ على حدة). واللافت للانتباه أنه توجد مخمّنة أخرى تقدم توضيحا إضافيا بخصوص تناقص كثافة الأعداد الأولية، إنها «فرضية ريمان Riemann». وقد تمت **صياغة هذه المخمّنة عام 1850، ومازالت حتى الآن من دون برهان،** وهي تشكّل اليوم إحدى أهم مخمّنات الرياضيات. ويبقى أن نعرف ما إذا كان الأمر يتعلق بعائق ظرفي أو أنه يعكس صعوبة أكثر عمقًا.

هل تُطرح هذه القضية بخصوص مخمّنات أخرى عصيّة؟

نعم، لقد طرحت على سبيل المثال في حالة مخمّنة فيرما Fermat التي أصبحت نظرية عام 1994، بفضل <A. وايلز>[1]، وذلك بعد مضي 350 سنة على ظهور نصها (تقول النظرية إن المعادلة $x^p + y^p = z^p$ لا تقبل حلولا x، y، z من الأعداد الصحيحة الموجبة إذا كان العدد الصحيح p أكبر من 3 أو يساويه). وفي العصر الحديث تساءل بعضهم، أمام عناد مخمّنة فيرما ـ وقد حدث هذا أيضا مع مخمنات أخرى ـ عما إذا كان الأمر يتعلق بعبارة لاحسمية. لكن هذا القول لا يحمل معنى إلا إذا وضّحنا نظام المسلّمات الذي نعتقد أن فيه عبارة لاحسمية. ذلك أنه لا توجد عبارات لاحسمية بصفة مطلقة، فليس هناك سوى لاحسمية نسبية، أي بالنسبة إلى نظام مسلّمات معيّن.

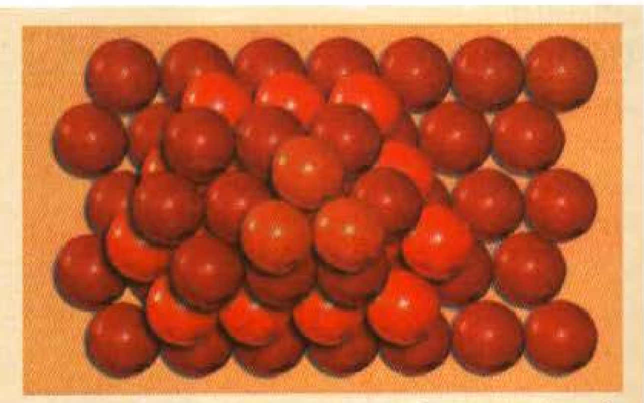
هناك نظريات لم يتم البرهان عليها إلا باستخدام الحاسوب. ألا توجد هنا محدودية لسلطة الرياضياتيين؟

سوف أعرض مثالا يوضح ما هو الوضع اليوم. لقد كانت أول مسألة تم حلها باستخدام الحاسوب استخداما أساسيا هي **مسألة الألوان الأربعة** four colour problem. تنص هذه المسألة على أن كل خريطة جغرافية مستوية (مهما كانت تعقيداتها، شريطة أن يتشكل كل بلد من منطقة واحدة) تتطلب فقط أربعة ألوان لتلوينها بشكل يكون فيه لونا كل بلدين متجاورين مختلفين. وقد لاحظ هذه الخاصية أحد علماء الخرائط الإنكليز عام 1852، لكن البرهان لم يقم إلا عام 1976 على أيدي الرياضياتييْن الأمريكييْن <K. أپل> و <W. هاكن>. غير أن برهانهما تطلب، فيما تطلب، استعراض عدد ضخم من التشكيلات، وهو العمل الذي كُلّف بإنجازه الحاسوب. ذلك أنها مهمة شاقة لا يمكن القيام بها يدويا. وعليه كان لزاما أن نثق في الحاسوب لتصديق برهان هذه المسألة. وهنا كان البعض منزعجا من عملية تخويل السلطة للآلة، إلا أن عمل الحاسوب يمكن أن يراقب من خلال حاسوب آخر. وقد تمّ بعد سنوات إدخال بعض الاختصار على البرهان. ومن ثمّ، صارت اليوم بعض البراهين التي ساعد على إنجازها الحاسوب براهين مقبولة في معظم الأحيان، شأنها شأن البراهين التي يقوم بها الرياضياتي يدويًا من أولها إلى آخرها. والملاحظ أن هناك وضعيات لم تُثر الكثير من التردد. مثال ذلك المخمّنة المسماة مخمّنة روبنس Robbins التي صيغت عام 1933، وحُلّت عام 1996 بواسطة الحاسوب. غير أن البرهان المقدّم من قبل الحاسوب كان قصيرا نسبيا، فتم التأكد منه يدويا. ومن الواضح أن ذلك أفضل.

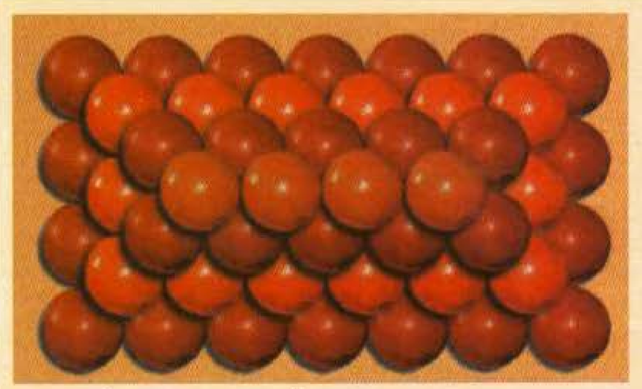
هناك أيضا حالات تظل فيها مسألة تصديق البرهان عالقة...

هذا صحيح، وهو ما حدث في مخمّنة كپلر Kepler التي تقول إن التكديسات الأكثر كثافة لكرات متطابقة لها (التكديسات) الكثافة نفسها التي نجدها بوجه خاص لدى باعة البرتقال. نعتبر تنضيدا طَبَقيا توضع فيه الكرات وفق شبكة مربعة، وتنضيدا طَبَقيا آخر وفق شبكة مثلثية. إن لهذين التنضيدين الكثافة نفسها، وهي تساوي $\pi/\sqrt{18}$. والمطلوب هو إثبات أنها تمثّل الكثافة الأعظمية. كانت هذه المسألة مطروحة منذ مطلع القرن السابع عشر. وفي عام 1998 قدم الرياضياتي الأمريكي <T. هيلس> برهانا على مخمّنة كپلر، وهو عمل تطلب الكثير من الحسابات المعقدة قام بها الحاسوب، ولا يمكن التأكد منها يدويا. ثم إنه لا يستبعَد أن ترتكب البرامج الحاسوبية المستخدمة في هذه الحالة أخطاء حسابية؛ لذا ثمّة صعوبة في التحقق من البرهان. والجدير بالذكر هنا هو أن لجنة الخبراء التي كُلِّفت بفحص برهان <هيلس> قبل الموافقة على نشره لم تبت بشكل نهائي في صلاحية البرهان، لأن هؤلاء الخبراء لم يقوموا بما يكفي من الحسابات التي تمكّنهم من التحقق من البرهان. ولحل هذا الإشكال، اقترح <هيلس> حلا تمّ العمل به عام 2005 بخصوص مسألة الألوان الأربعة: يتمثّل ذلك في إعداد صيغة للبرهان (تكون فيها جميع مراحل الاستدلال والحسابات معروضة على شكل قواعد منطقية صورية تعمل ضمن نظام مسلّماتي مفروض)، ثم التحقق من البرهان بواسطة الحاسوب. إن جعل العمل على شكل قواعد أمر ليس بالسهل، لكنه سييسّر التأكد من صحة البرهان من خلال الأداة المعلوماتية. وهنا لدينا ناحية ذات أهمية خاصة: إن الحاسوب لا يساعد على إثبات النتائج فحسب بل يساعد أيضا على التأكد من براهين طويلة ومعقّدة؛ وفي بعض الحالات الخاصة يبدو الحاسوب الأداة الوحيدة التي يمكنها توفير ضمان أخير للمصداقية.

(1) انظر: «مبرهنة فيرما الأخيرة»، **العلوم**، العدد 1 (1999)، ص 26.



تنص مخمّنة كپلر Kepler على أن التكديسات الأكثر كثافة لكرات متطابقة، لا تتجاوز كثافتها (التكديسات) $\pi / \sqrt{18}$ وهي كثافة التكديسيْن المنتظميْن الممثليْن هنا (شبكة مثلّثية في اليمين، وشبكة



مربّعة في اليسار). وفي عام 1998، اقتُرح برهان طويل ومعقّد على هذه المخمّنة، لكنه لم يتم التصديق عليه لغاية الآن: بعض أجزاء هذا البرهان تستخدم برامج حاسوبية يعتبر التأكد من صحتها بالغ الصعوبة.

هل بإمكانكم تقديم بعض الأمثلة حول مخمّنات كبرى تعتبر مهمة، ومع ذلك ظلت بمثابة مسائل مفتوحة؟

ثمّة أنواع متعددة من المخمنات الرياضياتية، بل وضعت كتب خصصت بأكملها لعرض مسائل غير محلولة. كما توجد بعض المسائل الشهيرة المتميّزة ببساطة طرحها أو بأهميتها البالغة. وقد أشرت آنفا إلى فرضية ريمان. وهناك أيضا مخمنات حسابية من مميزاتها سُهولة طرحها، وهي تبدو كالنوادر، لكني لا أعتقد أنها كذلك. وإحدى هذه المخمنات مخمنة الأعداد الأولية التوائم. ثمّة

كن للحاسوب المساعدة على إثبات بعض النتائج، لكنه
تطيع أيضا المساعدة على التحقق من براهين طويلة ومعقدة.

اعتقاد بأنه يوجد عدد غير منته من أزواج الأعداد الأولية التوائم، أي أزواج الأعداد الأولية التي يساوي الفرق بين عددي هذه الأزواج 2 (مثل الأزواج 17 و 19؛ 59 و 61؛ 827 و 829؛ ...) وفضلا عن ذلك يلاحظ أن تناقص الأعداد الأولية التوائم في مجموعة الأعداد الأولية هو من المرتبة نفسها التي تناقص وفقها الأعداد الأولية في مجموعة الأعداد الصحيحة جميعها. غير أنه لم يتم البرهان على وجود عدد غير منته من الأعداد الأولية التوائم، ولا على تناقص كثافتها وفق القانون الذي توحي به المشاهدات. كما أن هناك مسألة حسابية شهيرة، هي مخمّنة كولدباخ Goldbach التي تنص على أن كل عدد زوجي صحيح أكبر من 2 يكتب دائما على شكل مجموع عددين أوليين (مثال. 44 = 37 + 7).

هل هناك وعود بمكافاة مالية لحل بعض كُبرى المخمنات...؟

نعم، وهذه هي حال المخمنة المسماة P ≠ NP، التي تعتبر واحدة من المسائل الرياضياتية السبع التي خصصت لها عام 2000 مكافات (مليون دولار لكل منها) من قبل **معهد كلاي** Clay[1]، ومخمنة P ≠ NP قضية عميقة تتناول موضوع الصعوبة في المسائل المطروحة.

لنأخذ على سبيل المثال مربعات **السودوكو**[2] sudoku التي تكون شبكاتها بحجم $3^2 \times 3^2$ (9 x 9)، والتي يمكن تعميمها إلى حجوم أكبر، مثل $4^2 \times 4^2$، $5^2 \times 5^2$، إلخ. ويمكن أن يكون حل مسألة من مسائل السودوكو بالغ الصعوبة، والشائع أن الصعوبة تتزايد مع ازدياد حجم الشبكة. فقد تمّ بالفعل البرهان على أن حل مسألة السودوكو ذات الحجم $n^2 \times n^2$ بالغ الصعوبة، بمعنى أنها مسألة **«NP ـ تامة»**[3] NP-complete. ويدل الانتماء إلى هذا الصنف من الصعوبة على أن المدة اللازمة لحل مسألة سودوكو $n^2 \times n^2$ تتزايد آسيًا مع n. غير أننا لن نكون متأكدين من ذلك إلا عندما نبرهن على أن كل مسألة «NP ـ تامة» مسألة صعبة أسيًا. ذلك هو بالضبط موضوع المخمنة P ≠ NP. وثمّة العديد من الرياضياتيين والمعلوماتيين الواثقين من صحة هذه المخمنة، لكن لا أحد منهم استطاع الإتيان ببرهان عليها. والأخطر من ذلك أن هناك من يدرس بجدّ احتمال أن تكون المخمنة P ≠ NP[3] لاحسمية ضمن النظام المسلّماتي المعتاد للحساب، إلا أنه لا يتوافر لدينا حتى اليوم أي مسلك قد يؤدي إلى برهان هذه المخمنة، إذ إن جميع الطرائق فشلت في هذا المضمار. إننا أمام لغز كبير، طرحته دعوى (P ≠ NP) تبدو بديهية، لكننا لا نرى سبيلا إلى إثباتها ■

(1) طرح الألماني «د. هيلبرت» (1862 - 1943) عام 1900 في المؤتمر الدولي الثاني للرياضيات 23 مسألة رياضياتية معقّدة شغلت منذ ذاك التاريخ جميع الرياضياتيين. وقد أدى ذلك إلى ظهور فروع رياضياتية جديدة. وفي عام 2000، وأسوة بـ «هيلبرت»، بادر الأمريكي «ل. كلاي» [مؤسس معهد كلاي للرياضيات] إلى تمويل جائزة بسبعة ملايين دولار من أجل حلّ سبع مسائل رياضياتية مستعصية سميت مسائل القرن الحادي والعشرين.

(2) لعبة السودوكو: السودوكو مربع يحمل جدولا يتكون من 9 أسطر و 9 أعمدة، ويُقسم المربع إلى مربعات صغيرة تحمل جدولا بـ 3 أسطر و3 أعمدة صغيرة يملأ جزء من الخانات بالأعداد من 1 إلى 9، ويطلب أن نملأ باقي الخانات بالأعداد من 1 إلى 9 بحيث لا يتكرر العدد نفسه في العمود نفسه، ولا في السطر نفسه، ولا في أيّ مربع من المربعات الصغيرة. ثم تطورت هذه اللعبة وأصبح المربع الكبير يحمل أكثر من 9 خانات عموديا وأفقيا. انظر «*العلم وراء لعبة سودوكو*»، **العلوم**، العددان 7/6 (2006)، ص 22.

(3) انظر: «*حدود البحث عن سبب*»، **العلوم**، العددان 4/3 (2006)، ص 11.

قوة المحولات الريبية[*]

إن اكتشاف بقايا من عالَم منسي تُسيِّره جزيئات الرنا RNA قد يقود إلى وسائل جديدة لمكافحة الأمراض.

<E. J> باريك> ـ <R. R> بريكر>

في خريف عام 2000، أثار فضولنا لغز يتعلق بالطريقة التي تتدبر بوساطتها **البكتيرات**[1] أمر فيتاميناتها. فإضافة إلى الدليل المتزايد الذي يدعم النظرية المثيرة للتحدي المتعلقة بالحياة الباكرة على الأرض، جنبا إلى جنب مع جهودنا الخاصة لبناء **محولات** switches بدءا من جزيئات بيولوجية، فإن الأحجية البكتيرية وجهت مجموعتنا المختبرية في جامعة ييل للبحث عن حل لهذا اللغز. وما وجدناه كان مفاجأة تفوق كثيرا في غرابتها ما توقعناه: كان شكلا جديدا من أشكال الضبط الخلوي الذاتي، عماده واحد من أقدم أنماط الجزيئات المعروفة في الخلية: إنه الحمض النووي الريبي، أو **الرنا** RNA.

ومع أنه عُدّ بصورة أساسية ولردح طويل من الزمن **مرسالا**[2] متواضعا، فقد كان يمكن أن يصير للرنا، كما اتضح فيما بعد، سلطان مهم واليات معقدة كي يفرض الاعتراف بحقوقه. ومع أن وظائف هذا الصنف الحديث الاكتشاف من جزيئات الرنا، التي أطلقنا عليها اسم **المحولات الريبية** riboswitches، لا تزال قيد التوصيف، فمن الواضح فعلا أنها قد تقدم طرائق جديدة لمكافحة الأمراض البشرية. فمثلا، تُعوِّل كثرة من أنواع المُمْرِضات البكتيرية على المحولات الريبية كي تضبط أوجها مختلفة من الاستقلاب الأساسي الخاص بها.

إن استمرار هذا الشكل القديم من التنظيم الذاتي في الكائنات الحية الحالية يشهد على أهمية هذا التنظيم: فالخلايا البكتيرية تتمتع بتلاؤم مدهش وبكونها مصانع كيميائية ذاتية الاعتماد مكرسة لصنع منتج واحد نهائي: نسخ لانهائية (متصلة) من ذاتها. لكن فقط الذراري ـ التي تمكنت من الحفاظ على هذه **السلسلة السريعة من السُّلالات**[3] في وجه ذلك التنافس المُهلك على الموارد في بيئات متغيرة ـ هي التي بقيت حية هذا الأجل.

ضبط المخزون[**]

إن مقدرة البكتيرة على صُنع مئات الجزيئات المعقدة المطلوبة لتتضاعف (تتنسَّخ) ذاتيا خلال فترة تبلغ في قصرها عشرين دقيقة، تبدأ بجينوم **الدنا** DNA المزدوج الشريطة، الذي ينسخه كل كائن حي، جيلا إثر جيل، نسخا صحيحا مطابقا للأصل. إن كتيب التشغيل هذا مكتوب بالفباء النكليوتيدات الأربعة للدنا[4]، أي القواعد (الأسس) النتروجينية الأدينين والتايمين والسيتوزين والگوانين، التي تنتظم مرتبطة بعمود فقري يتعاقب فيه السكر والفسفات. إن ما يبلغ تسعين في المئة من دنا بكتيرة نمطية مكرسٌ لتعليمات تكوِّد تجميع قطع ماكينة البروتين، التي تسرع وتنظم الخطوات الكيميائية للاستقلاب الضروري لبناء خلية جديدة من لاشيء.

وتُستهل تلك السيرورة في أرضية المصنع الخلوي، عندما تشرع إنزيمات بوليميراز الرنا في الإمساك بالدنا الجينومي، وتبدأ بنسخ أجزاء من متْنه على شكل الجزيئات الكيميائية المماثلة من الرنا (**الحمض النووي الريبي المرسال**) (mRNA). وتكون الخلايا البكتيرية على عجلة من أمرها لدرجة أنه ما إن يكاد يشرع جزيء من البوليميراز في قراءة رسالة الدنا وفي نَسْخها، حتى يزحمه جزيء آخر من الإنزيم، متلهف ليبدأ النسخة التالية من الرنا. ويُكوِّد معظم الرسائل بروتينا مفردا، مع أن بعضها، ويُعرف **بالأوپيرونات (المشغّلات)** (operons)، يصف كيفية صنع طاقم تام من **البروتينات المتصلة تشغيليا**[5] بعضها ببعض. ويُعَدُّ الرنا من الناحية الكيميائية أقل ثباتا من الدنا، وتتعامل الخلية البكتيرية مع هذه النسخ المتعددة من **الرنا المرسال** (mRNA) وكأنها **صور ضوئية ورقية**[6] فسرعان ما تُمزَق نسخ الرنا المرسال غير المستعملة وتعيد دورتها، وبذلك تُوزع فقط

(*) THE POWER OF RIBOSWITCHES
(**) Inventory Control
(***) Overview: Flipping Ancient Switches
(1) جمع بكتيرة.
(2) messenger أو رسيل.
(3) humed chain of descent
(4) text
(5) operationally related proteins
(6) paper photocopies

نظرة إجمالية/ مناولة محولات بالغة القدم[***]

- تعود مهمة تنظيم فاعلية الجينات عادة إلى بروتينات المراقبة، ولكن بكتيرات معينة تستعمل رسائل الرنا كي تشرف على بعض البنى التحتية الخلوية القيمة.
- إن أشكال الرنا ذات القدرات الشبيهة بالبروتينات تقدم دعما لفرضية عالم أولي يحكمه الرنا.
- إن المحولات الريبية التي اكتشفت حديثا هي مجموعة من جزيئات رناوية؛ تحمل رسائل تُنتسخ من الدنا، وتتخذ أيضا القرارات اللازمة فيما إذا كان يجب تنفيذ تلك التعليمات المتضمنة في الرسائل.
- تنظم المحولات الريبية عددا كبيرا من السيرورات الأساسية في الميكروبات؛ وهذا يجعل تلك المحولات أهدافا محتملة لعقاقير جديدة مضادة للميكروبات.

النسخ ذات أوامر التشغيل الطازجة على **الريبوسومات**(1) **ماكينات مصنع بناء البروتينات**(2).

كما أن الريبوسومات هي الأخرى، على عجلة بالغة من أمرها. فتصطف نمطيا كالشاحنات الصندوقية للقطار، كي تشرع في قراءة وتنفيذ تعليمات الرنا المرسال، حتى قبل أن ينهي تماما إنزيم البوليميراز نسخ الرنا المرسال. فالريبوسومات تتحرك برشاقة على طول مسار الرنا المرسال لتحل (تفك) كود كلّ ثلاثية من ثلاثيات النكليوتيدات المتعاقبة، مترجمة إياها إلى الحموض الأمينية النوعية التي تُكوِّدُها، وتضيفها إلى السلسلة الببتيدية النامية. ومع انبثاق الجزيء البروتيني من الريبوسوم، فإنه ينثني على نفسه ليشكل بنية ثلاثية الأبعاد معقدة، وتتحرر بذلك قطعة جديدة من الماكينة وتغدو جاهزة للقيام بوظيفتها.

وتعتمد الخلية اعتمادا خاصا على فئتين من البروتين كي تُبقي على إنتاجها الكيميائي ناشطا على نحو سَلس: البروتينات الناقلة التي تحمل جيئة وذهابا المواد الأولية، والإنزيمات التي تسرع استحالة تلك المواد عبر خطوات متعاقبة في دوائر الاستقلاب ومسالكه ذات السرعة البالغة. ولكن البكتيرات حريصة على ألاّ تبدد شيئا من مواردها بصنعها بنى تحتية غير ضرورية، لذا فقد أنشأت آليات ضبط تستطيع إعاقة نقل أوامر تشغيل تلك التجهيزات كاستجابة لتغيرات في احتياجها إلى **المغذيات**(3) ومبلغ تيسر الحصول على هذه المغذيات. وما إن فهم العلماء الكيفية التي تعمل وفقا لها تلك المراقبات الخلوية، حتى برز، بادئ ذي بدء، سر تدبر أمر الڤيتامينات.

نمطيا، توظِّف البكتيرات عددا من البروتينات تتفحص باستمرار المخزونات المتاحة من المواد الأولية المختلفة، وتعدِّل وفقا لذلك عدد البروتينات الناقلة والإنزيمات المخصصة لكل خط من خطوط الإنتاج. فمثلا **الكابت Lac**(4) Lac repressor في بكتيرة المعى «*الإشريكية القولونية*» هو معقد بروتيني يحصر حرية الوصول إلى **النسخ الأصلية**(5) للدنا لكل من البروتين الناقل الذي يضخ سكر اللاكتوز (سكر اللبن) داخل الخلية، كما يحصر إنزيما



يشطر جزيء اللاكتوز إلى جزيئين منفصلين ليصبح بذلك متاحا للاستعمال كوقود عندما تدعو الحاجة إلى ذلك. وحالما يصبح تركيز اللاكتوز فوق عتبة معينة، فإن **معقد Lac**(6) ينفصل عن **قالب** template الدنا، فيزول فعله الكابت، الأمر الذي يسمح باستهلال انتساخ الجينات.

إن آلية تنظيمية مماثلة، تعتمد على بروتينات مراقبة، تقرر ما يجب فعله بشرائط الرنا المرسال التي انتسخت من الدنا الجينومي. ففي بكتيرة التربة «*العصوية الرقيقة*» *Bacillus subtilis* يوجد معقد بروتيني، يعرف باللفظة الأوائلية TRAP، يتحكم في أوبيرون (مشغل) يكود إنزيمات خاصة بتركيب الحمض الأميني «تريبتوفان»، كما يتحكم في أوبيرون آخر يكوّن ناقل التريبتوفان. فعندما يتحسس المعقد TRAP أنه لا حاجة للبكتيرة إلى هذين البروتينين، فإنه يرزم (يلف) النهاية الموجِّهة (القائدة) لتعليمات الرنا المرسال حول ذاتها رَزْما محكما. وهذا الرَّزْم يمنع الريبوسوم من تعرف موقع وظيفي صحيح على نسخة الرنا المرسال الخاصة بالبروتين الناقل كي يشرع في الترجمة. إن **مصادرة**(7) النهاية الموجِّهة لشريطة الرنا المرسال المتكونة تتسبب في انثناء سائر الشريطة على شكل دبوس الشعر تترابط شُعيبتاه إحداهما بالأخرى بتزاوج (تشافع) النكليوتيدات.

(1) أو الريباسات أو الجسيمات الريبية.
(2) factory's protein-building machinists.
(3) أو الغذيّات.
(4) Lac: أوبيرون لازم لنقل سكر اللاكتوز واستقلابه في الإشريكية *القولونية* وبعض البكتيرات المعوية الأخرى، ويتكون من جينة منظمة وجينات تركيبية.
(5) blueprints.
(6) Lac complex.
(7) sequestration.

(التحرير)

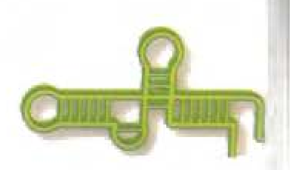
المتمام، الأمر الذي يؤدي إلى إنهاء انتساخ الرسالة على نحو مبتسر (قبل الأوان) [*انظر المؤطر في الصفحة المقابلة*].

إضافة إلى هذه التجهيزات الخاصة بتنظيم ماكينة تصنيع البروتينات الخلوية الأساسية، فإن البكتيرات تتجول حاملة صندوق أدوات ضخما، تصنع بوساطته مواد كيميائية دخيلة. فمثلا، علينا نحن البشر أن نحصل على المغذيات، التي نسميها ڤيتامينات، مما نأكل؛ في حين أن البكتيرات تعرف كيف تصنعها بتجميعها من لاشيء. إن مجموعة كبيرة من الڤيتامينات الأكثر تعقيدا هي في الواقع نسخة محوَّرة من **تميمات الإنزيمات**[1] coenzymes. إنها، كما يلمح إلى ذلك اسمها، جزيئات صغيرة تساعد الإنزيمات البروتينية على إنجازها وظائفها: إنها أدوات تخصص ذات وظائف كيميائية فعالة، تماثل المسدسات المسمارية أو أدوات قطع الماس. وللمسارات الاستقلابية الطويلة صلة ببناء تميمات الإنزيمات من مواد أولية. ومن الطبيعي أن تضبط البكتيرات المقتصدة هذا البناء الثمين بإحكام، وذلك بإيقاف المسارات الاستقلابية عندما لا تكون هناك حاجة إلى تميمات الإنزيمات.

وفي وقت متأخر من التسعينات تحرى العلماء بدقة الكيفية التي يتم بوساطتها تنظيم صنع بعض تميمات الإنزيمات في البكتيرات، فتعرّفوا طرزا جزيئية تذكِّر بمنظومتي TRAP والكابت Lac. ومع ذلك، فإن محاولاتهم تعرُّف بروتينات الرقابة المسؤولة عن تحسس كل تميم إنزيمي والتحكم في انتساخ أو ترجمة الرنا المرسال استجابة لهذا التحسس، تمخضت عمليا عن لاشيء. وبرز سر أكثر غموضا. إذا لم يكن عن طريق بروتينات رقابة افتراضية، فكيف يمكن إذًا لماكينة الخلية أن تقيس مستويات تلك **المغذيات** nuetrints؟ لقد أتت الإجابة غير المتوقعة من أعمال الباحثين الذين يدرسون تطبيقات لجزيئات الرنا. وهي ظاهريا ليست بذات صلة. وبغية فهم كيف حدث ذلك، لا بد إذًا من العودة ثانية إلى الريبوسوم.

ميراث عالم الدنا(*)

قد تشكل البروتينات العجلات وأسنان العجلات والقنوات والأحزمة (السيور) التي تنقل المواد الأولية إلى داخل خلايا جديدة، ولكن ليست جميع التجهيزات الأساسية في المصنع (الخلية) مبنية من البروتين. والأكثر جدارة بالذكر أن للريبوسوم لُبّاً يتكون من النكليوتيدات ذاتها التي تشكل رسائل الرنا المرسال التي يقرؤها. ومع أن **الرنا الريبوسومي**[2] (rRNA) يستهل كنسخة من **شريط التلغراف الكاتب**[3] لنسخة الدنا الأصلية، فهو يختلف عن الرنا المرسال في أنه لا يحتوي على تعليمات لصنع شيء آخر. وبدلا من ذلك، فإن الرنا الريبوسومي يتثنى آنيا على نفسه في شكل محدد تماما، تترابط في داخله قواعد النكليوتيدات بعضها ببعض، فتتشابه كثيرا مع الحلقة الطرفية المُنهية لدبوس الشعر.



كانت هذه النسخ الضوئية تنثني كأوراق أوريجامي[9] «ممسوسة»[10]، وتختار مصائرها الذاتية.

ويتثنى الرنا الريبوسومي على نطاق أكبر بكثير، ليتضمن عددًا من الوحيدات التي تتقوى مواضعها أكثر فأكثر بتحويرات كيميائية دقيقة. ويقوي قوام البروتين ودعامته **أفلاع**[4] هذه **الوحيدات** subunits ويغلف سطوحها. لكن دراسات البنية بالتحليل الذري أوضحت أن لب الريبوسوم المسؤول عن تحفيز تكوين الروابط الجديدة بين الحموض الأمينية، يتألف حصرا من الرنا.

ومما لا ريب فيه أن البراهين الحديثة على بنية الرنا ذي المقدرة البروتينية التحفيزية كانت موضع إثارة لدى حَسَنَي الاطلاع على نظرية بداية الحياة التي تقدم بها في نهاية السبعينات <H. هوايت III> [من جامعة ديلاوير]. فقد لاحظ هذا الباحث أن كثرة من تميمات الإنزيمات المهمة يحتوي تركيبها الكيميائي على مكونات من الرنا مثيرة للفضول. فمثلا أدينوزيل كوبالامين (تميم إنزيم B_{12}) يحتوي على **نكليوتيد كامل من الرنا**[5]؛ كما أن بيروفسفات الثيامين (تميم إنزيم B_1) تحمل معها **قطعة** piece ذات عمود فقري يتألف من السكر والفسفات. ويبدو أن تلك **القطع** bits من النكليوتيدات تعمل كمقابض تمسك بها البروتينات. وحينئذ صرّح <هوايت> أنه يمكن أن تكون هذه القطع بقايا أثرية، تعود إلى **زمن بدئي سحيق**[6] لم تطور فيه بعد **الخلايا البدئية** proto cells تخزين الدنا الحديث أو تركيب البروتين. وبدلا من ذلك، فإن الرنا كان يقوم حينذاك بمهمة مزدوجة: جزيء يختزن المعلومات و**بوليمر**[7] **بيولوجي** biopoloymer قادر على الانثناء ليشكل ماكينة استقلابية، ويؤدي الوظيفة المعقدة المنوطة عموما ببروتينات اليوم.

وفي بدايات الثمانينات تم اكتشاف مثالين «حيين» على هذه العناصر القديمة من الرنا. أحدهما الإنزيم RNase P: جزيء رنا يوجد في البكتيرات التي تستطيع أن تشطر نسخا من الرنا الخام. أما المثال الآخر فهو تسلسلات مدهشة من الرنا **تحرر** edit نفسها بنفسها من نسخ أطول من الرنا المرسال، فتنجز تفاعلات الشطر الذاتي من خلال سلسلة تبادل روابط كيميائية. وقد فاز <S. ألتمان> [من جامعة ييل] و<T. R. سيش> [من جامعة كولورادو ببولدر] بجائزة نوبل للكيمياء عام 1989 لاكتشافهما، على نحو مستقل، هذه البيانات التي أوضحت أن جزيئات الرنا ـ التي كان ينظر إليها حتى حينها على أنها مجرد **رسائل سلبية غير فعالة**[8] ـ تستطيع التثني في شكل بنى ثلاثية الأبعاد معقدة، وتسرِّع التفاعلات الكيميائية، تماما كما تفعل الإنزيمات البروتينية. وإجمالا، سميت إنزيمات الرنا هذه، بما في ذلك

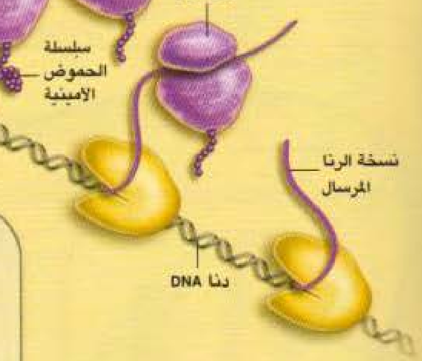
(*) RNA World Legacy
(1) أو مساعدات الإنزيمات أو الكوإنزيمات
(2) أو الريبي أو الريباسي
(3) ticker-tape trascript
(4) crevices
(5) RNA nucleotide
(6) primordial time
(7) ويقال أيضا متماثر مكثور
(8) passive messages
(9) origami فن ياباني مشهور خاص بطي الأوراق وتشكيلها في صورة أسماك وطيور وحشرات
(10) possessed (التحرير)

پروتينات المراقبة في المصنع الخلوي[*]

لكي يتناسق في البكتيريات صنع الأجزاء التي تحتاج إليها لتبقى وتتضاعف (تتنسّخ) ولجعلها أقرب ما يكون إلى الكمال والفاعلية، تستعمل هذه الخلايا نمطيا پروتينات مراقبة. وتستطيع هذه الپروتينات أن تكبت إنتاج التجهيزات حتى تستشعر الحاجة إليها، وتتحسس أن المواد الأولية اللازمة لصنع هذه التجهيزات متاحة. إن معرفة الآليات التي تستعملها البكتيرات ساعدت على اكتشاف وجود المحولات الريبية.

أرضية المصنع

إن خطوط التجميع ذات الحركة السريعة تصنع التجهيزات الخلوية بناء على التعليمات المُكَوّدة في جينات الدنا (*في اليمين*). تتحرك إنزيمات پوليميراز على طول شريطة الدنا، ناسخة جينة معينة إلى نسخة من الرنا المرسال (mRNA). يمسك الريبوسوم بالرنا المرسال بمجرد انبثاقه، ويشرع في ترجمة الرسالة التي يحملها إلى سلسلة من الحموض الأمينية؛ تنثني على نفسها لتشكل پروتينا كاملا (وظيفيا).



جينة الإنزيم لا تعمل (حالة وقف تشغيل)

معقد كابت Lac

موقعُ استهلال الانتساخ مثبط

جينة الإنزيم تعمل (حالة تشغيل)

وُحيدة Lac

مُستقلب لاكتوز

مواصلة الانتساخ

جينة تركيبية لا تعمل

المعقد TRAP

تريپتوفان

موجّه الرنا المرسال

دبوس شعر مثله

جينة ناقلة لا تعمل

موقعُ استهلال الترجمة مُثبط

إدارة المخزون

تنظم پروتينات المراقبة صنع البكتيرة لأجزائها الأساسية من خلال آليات متنوعة (*في اليسار*).

يقوم معقد كابت Lac[1] Lac supprocer (*في الأعلى*) بوقف تشغيل جينة تُكوِّد إنزيم شطر اللاكتوز عن طريق إحصار إنزيم الپوليميراز من الوصول إلى الدنا وذلك في حال غياب اللاكتوز. ولكن عندما يكون تركيز اللاكتوز مرتفعا، فإن أحد مستقلباته يرتبط بأفلاع (بشقوق) clefts في وحيدات Lac[2]، فيتحرر الدنا ويتم تشغيل الجينة.

ينظم المعقد TRAP عمل الجينات ذات الصلة بتركيب ونقل الحمض الأميني «تريپتوفان»، وذلك باعتراضه نسخ مراسيل رناوات هذه الجينات بطريقتين. ففي حال وجود التريپتوفان، يرزم هذا الحمض الأميني نهاية التسلسل الموجّه (القائد) للرنا المرسال الخاص بتركيب التريپتوفان حول نفسها، مسببا تغير شكل جزء من شريطة الرسالة إلى شكل دبوس الشعر؛ وهذا يتسبب في إنهاء الانتساخ على نحو مبتسر (قبل الأوان) (*الشكل السفلي الأيمن*). كما أن التريپتوفان يعزل التسلسل الموجّه الخاص بمرسال نقل التريپتوفان، فيحصر الريبوسومات من الوصول إلى موقع استهلال الترجمة (*الشكل السفلي الأيسر*).

الريبوسومات، «**الريبوزيمات**» ribozymes

وفي بدايات التسعينات تطورت أدوات البحث الخاصة بمنابلة الجزيئات البيولوجية خارج الخلايا الحية تطورا استطاع معه الباحثون أن يجربوا باستعمالهم استعمالا خلاقا المقدرة المكتشفة حديثا للرنا ليثني نفسه ويتخذ أشكالا وظيفية ومعقدة وجزئيا، كان العلماء ينشدون اختبار الاستعمالات المتعددة للرنا، ومن ثم معقولية فرضية عالم الرنا: كما أنهم كانوا يبحثون عن تطبيقات تقانية بيولوجية (حيوية) جديدة للريبوزيمات.

وتمثل إسهام مجموعتنا البحثية في هذا المسعى بما قادنا في النهاية إلى تقصي ما بعد الپروتينات، وذلك في ما يتعلق **بالمنظمات الغامضة (الخفية)**[3] لإنتاج تميمات الإنزيمات البكتيرية.

مجسّات طبيعية[**]

لقد طورت مختبرات <L. گولد> [من جامعة كولورادو ببولدر] و<G. جويس> [من معهد سكريبس للأبحاث] و<W .J. شوستاك> [من مستشفى ماساتشوستس العام] طريقة لإحداث التطور في أنبوب الاختبار. مكّنتهم من إخضاع تريليونات من تسلسلات الرنا التركيبية لاختبار دارويني؛ أي إن الجزيئات الأصلح (الأكثر تلاؤما) ستستمر. فباستعمال هذا التطور التجريبي (في أنبوب الاختبار)، اكتشفت مجموعة «شوستاك» وبسرعة تنوعات من بنى رناوية قصيرة

(*) PROTEIN SUPERVISORS IN THE CELLULAR FACTORY
(**) Natural Sensors
(1) Lac repressor
(2) Lac subunits
(3) mysterious regulators

يمكنها أن ترتبط ارتباطا وثيقا بثالث فسفات الأدينوزين (ATP)، وكذلك بملونات عضوية كثيرة وبحموض أمينية وبمضادات حيوية.

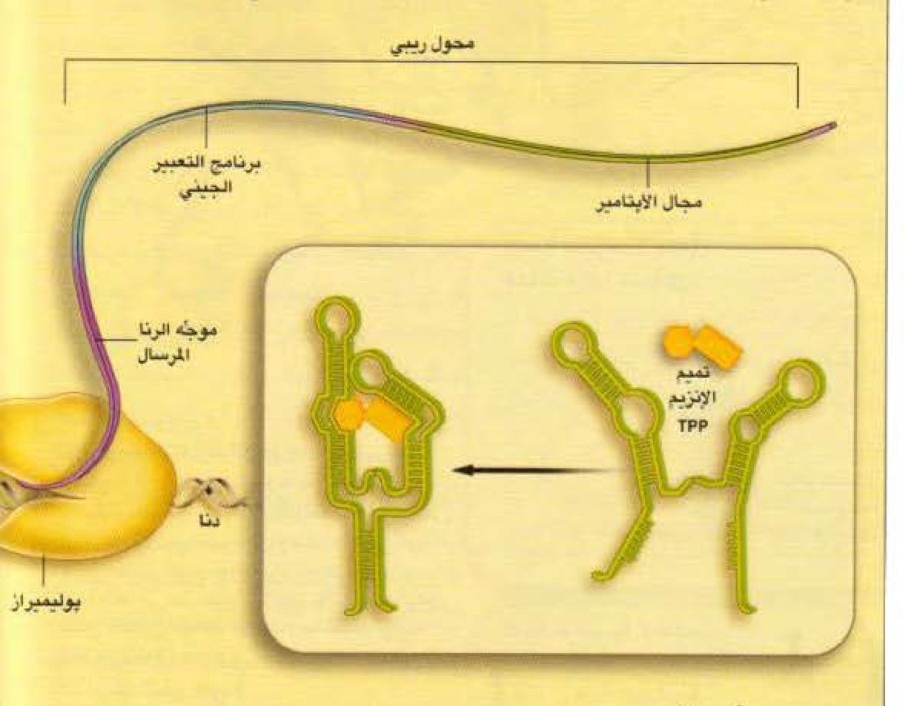
أطلق «شوستاك» على جميع هذه الجزيئات الرناوية التي استولدت في المختبر اسم **أپتاميرات (الملئمات)** aptamers، وهو مصطلح اشتق من الاسم اللاتيني aptus ويعني **ملائم (صالح)** fitted. وعلى الرغم من منشئها اللاطبيعي، فإن أپتاميرات كثيرة تمتلك خاصية (نوعية) أكثر أهمية في السياق البيولوجي من مجرد ارتباطها بإحكام بجزيئاتها المستهدفة: إنها ترفض جزيئات ذات تراكيب شديدة العلاقة.

لقد شرع مختبرنا في استثمار هذه الانتقائية الرفيعة بتصميم **محس** sensor يُصنع من الرنا. وكانت الخطة تقتضي إنشاء أپتامير بمقدوره تعرف الجزيء المستهدف، وذلك بارتباطه به ووصله بقطعة أخرى من الرنا يمكنها أن تؤشر لحدث الوصل بمُقْرِنة مرنية. وبغية تحقيق الدور الأخير، وقع اختيارنا على الريبوزيم **رأس المطرقة**[1] hammer head. وقد سمي كذلك بسبب بنيته ذات الشكل المميز، وهو واحد من الريبوزيمات المعروفة ببساطة **بنيتها وبكفاءتها العالية في الشطر الذاتي الطبيعي** self-cleaviage. فيمكننا، مثلا، أن نربط **ميسما متفلورا (متألقا)** flourescent tag بإحدى نهايتي شريطتي رأس المطرقة والتي تسمى مجموعة كابحة توهن الفلورة تقع على مقربة محكمة من الميسم، وذلك ضمن بنية الرنا المنثنية. وما إن تعثر نهاية أپتامير (خاص بجهازنا) على الجزيء المستهدف وترتبط به، حتى يفصل الشطر الذاتي الذي يقوم به رأس المطرقة المجموعةَ الكابحة عن الميسم المتفلور، فيضيء عندئذ الجزيء نفسه، كما لو أن الستار أزيل عن المصباح.

وقد برهن الرنا على تلاؤمه مع وظيفة المحس هذه لدرجة أننا استطعنا في ما بعد أن نطور ريبوزيمات مقترنة بأپتاميرات قادرة على تحسس تنوعات واسعة من الجزيئات وتقرير وجودها. ويمكن تصفيف مجموعتنا من المحسات على شيبة بالغة الصغر، واستعمالها للكشف الدقيق عن مركبات كيميائية كثيرة ومختلفة على نحو متزامن.

محولات ذاتية التقرير[*]

يعتمد تنظيم خلوي ذو شكل جديد، عُثر عليه مؤخرا، على نسخ رناوية معينة من الجينات لتر
نفسها بنفسها. إن المحولات الريبية هي قطع من نهاية التسلسل المُوجِّه (القائد) لنسخة الرنا المرس
يمكنها أن تعين احتياج الخلية من البروتين المُكوَّد (المُرمَّز) في بقية الرسالة، فتعيد عندئذ تنظيم شـ
الذاتي لتقرر في ما إذا كان ذلك البروتين سيُصنع. لذا، فالمحولات الريبية تمتلك مجالين مهمين: أپتا
(ملئم) يتحسس مُستقلبا معينا *(في الأسفل)*، وبرنامج تعبير جيني يؤثر في مصير الرنا المرسال
يُخضعه لواحد من عدد كثير من إعادة التنظيمات البنيوية الممكنة *(في اليسار)*.



تحسس المُستقلَبات

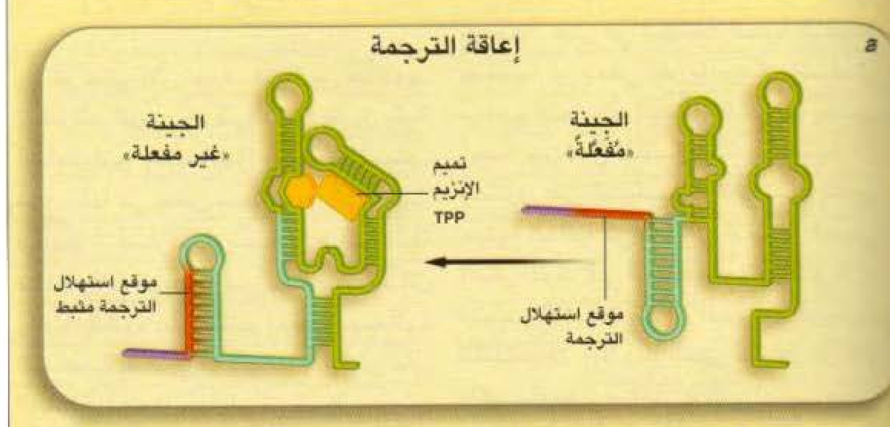
إن أپتاميرًا لتميم (مساعد) الإنزيم تيامين البيروفسفات (TPP) يحقق شكلا محددا *(في اليمين)*، وذلك عند مغادرته البوليميراز. وفي حال وجود تميم الإنزيم TPP فإن الأپتامير يرتبط به قابضا على الجزيء بإحكام *(في اليسار)*.

وذلك حتى ضمن مزيج معقد.

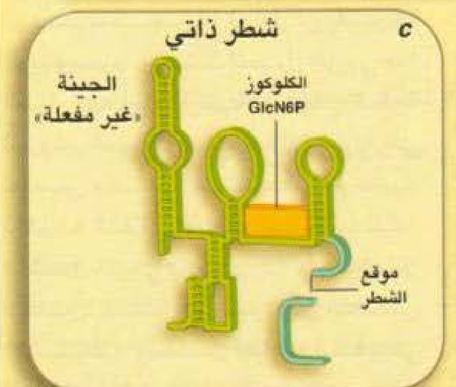
وبالفعل، فإن الوضع الذي مكننا من أن ننشئ **رناوات** RNAs تتحسس جزيئات صغيرة وتحفز ذلك الترابط على إعادة تنظيم هادف لبناها الذاتية، جعلنا نتساءل عما إذا كان التطور الطبيعي قد أنشأ أنواعا مشابهة من الرناوات. فالريبوزيمات من عالم الرنا لا تزال تؤدي بوضوح مهامَّ حاسمة في الكائنات الحية المعاصرة. فهل توجد تسلسلات غير مكتشفة لماكينات مهمة أخرى من الرنا، مخبأة في الجينومات المعاصرة؟

لقد شرعنا في تفحص سريع للأبحاث العلمية المنشورة (الأدبيات العلمية) بحثا عن إلماعات تشير إلى وجود ملئمات طبيعية، ولكننا لم نعثر إلا على إشارات مربكة تدل على وجود تسلسلات رناوية غير مُكوِّدة، يُعرف أنها مهمة بطريقة ما للتنظيم الخلوي. وعندئذ قادنا تقصينا إلى سر البكتيرات وڤيتاميناتها. فقد لفتت انتباهنا تنويهات بالبروتين BtuB الذي يشكل جزءا من جهاز نقل مساعد الإنزيم B_{12} إلى داخل بكتيرة *الإشريكية القولونية* *E. coli*. وتبدأ نسخة الرنا المرسال التي تكوِّد البروتين BtuB بموجِّه (بقائد) ضخم يتكون من 240 نكليوتيدا غير مُكوِّد، وزودنا طوله الاستثنائي بمفتاح

(*) SELF DETERMINING SWITCHES
(1) الجزء الضارب من المطرقة



b
إنهاء الانتساخ
الجينة «غير مفعلة»
FMN
دبوس شعر مُنْه



ستجابات المحول الريبي

ستعمل المحولات الريبية أنواعا مختلفة من الاستراتيجيات كي تضبط صنع البروتينات. ففي حال ياب تميم الإنزيم TPP مثلا، يمكن لبرنامج التعبير الجيني أن يترك موقع استهلال الترجمة متاحا ريبوسوم، فيسمح بذلك للتعبير عن التعليمات الجينية أن يبقى «في حالة تشغيل» (*a، في اليمين*). ا في حال ارتباط تميم الإنزيم TPP بالأپتامير، فإن بإمكان برنامج التعبير الجيني أن يشكل دبوس شعر يثبط الترجمة؛ وهذا «يوقف تشغيل» الجينة (*a، في اليسار*). ويشكل المحول الريبي الذي تحسس تميم إنزيم فلاڤين وحيد النكليوتيد (FMN) دبوس شعر مُنْهٍ يوقف انتساخ الرسالة الخاصة وساطة البوليميراز (*b*). إن ريبوزيما استثنائيا أُستثير من قبل الكلوكوز أمين-6-فسفات (GlcN6P) تف ذاته بشطر نفسه بنفسه (*c*).

اللغز الأول لاحتمال أن تكون لهذا التسلسل وظيفة غير عادية. كما أن فريقا بحثيا آخر قد بين فعلا أن إنتاج البروتين BtuB يتثبط عندما تكون تراكيز الڤيتامين B_{12} في الخلية مرتفعة. ومع هذا، فلم يتم اكتشاف بروتين خفير يستشعر الڤيتامين B_{12}.

ونحن نعلم من أبحاث سبق أن نشرها آخرون بأن وجود الڤيتامين B_{12} يمنع بطريقة ما ترابط الريبوسومات بالرنا المرسال الخاص بالبروتين BtuB. والمحت تجربة واحدة أيضا إلى أن تغيرا تركيبيا ما في تسلسل الرنا المرسال الموجِّه قد حدث في وجود الڤيتامين B_{12}. فهل من الممكن أن يكون التسلسل الطويل للرنا المرسال الموجِّه والخاص بالبروتين BtuB قد احتوى على أپتامير طبيعي رابط للڤيتامين B_{12} عمل على تنظيم التعبير عن التعليمات المكودة في الجينة ذاتها الخاصة بهذا البروتين؟

لقد استعملنا تقنية **السبر في الخط** in-line probing لوضع خريطة لأجزاء رسالة الرنا المرسال المكوِّد للبروتين BtuB، والتي أصبحت أكثر نظاما أو أكثر قابلية للانثناء في وجود الڤيتامين B_{12}. ووجدنا بوضوح أكثر ثنية (انجدالا) جديدة قرب بداية منطقة تكويد الرنا المرسال الخاص بالبروتين BtuB. ويمكن لهذه البنية أن تفسر تثبيط ترابط الريبوسوم. وفي ما يبدو، أن الرنا المرسال ذاته يتحسس الڤيتامين B_{12}، فينظم نقله بالطريقة نفسها التي ينظم بوساطتها البروتين TRAP رسالة نقل التريپتوفان في *العَضَويَّة الرقيقة B.subtilis* بمنع الريبوسوم من ترجمة هذه الرسالة. وبناء على ذلك، اطلقنا على هذا الجزيء من الرنا، الذي يستطيع أن يحول التعبير الجيني من **التشغيل إلى الإيقاف** from on to off، اسم «**المحول الريبي**» riboswitch.

وفي الوقت الذي كنا نتحرى فيه التسلسل الموجِّه الخاص بالبروتين BtuB، لفت انتباهنا أيضا وضع آخر لتنظيم غير مفسَّر. فلقد حدد بحث سابق أن أنواع الرنا المرسال المُكوِّدة لإنزيمات تركيب الڤيتامين B_1، ونواقل تميماته الإنزيمية في مجموعات مختلفة من البكتيرات تحوي جميعها مَدًّا[1] مشتركا من تسلسل الرنا. وأن الطفرات في هذا التسلسل عطلت الكبت السوي لهذه الجينات في الخلايا التي تراكمت فيها كميات كافية من الڤيتامين B_1. وفي الإشريكية القولونية أوپيرون (مشغل) إنزيمي تركيبي يمتلك مدا موجها (قائدا) يحوي هذا التسلسل قرب الموقع الذي تبدأ فيه ترجمة البروتين الأول. وقد استطعنا البرهنة على أن الڤيتامين B_1 يحث على تغير تركيبي في هذا الرنا المرسال على نحو ينغلق فيه بإحكام موقع الارتباط الخاص بالريبوسوم. وبعد ذلك حددنا أن مجالا صغيرا ضمن التسلسل الموجِّه، يتألف من 91 نكليوتيدًا فقط، يستطيع أن يرتبط بالڤيتامين B_1. وكمحساتنا الصنعية، فإن هذه المحولات الريبية الطبيعية تكونت من مجال أپتامير (ملئم) منفصل، يترابط بتسلسل «استجابي» وظيفي يتيح له تنظيم في ما إذا كان الڤيتامين B_1 سيُنتج.

لذا، لقد عثرنا على الأقل على نوعين من الرنا المرسال يتمتعان بمقدرة استثنائية على مراقبة الشروط الخلوية، وعلى اتخاذ قراراتها الذاتية فيما إذا كانت الماكينات البروتينية التي تُكوِّدها ضرورية كي تعمل دون تدخل من بروتينات مناظرة. فهذه النسخ الضوئية الورقية ليست رسائل سلبية غير فعالة. إنها تنثني مثل أوراق أوريجامي المسوسة، وتختار مصائرها الذاتية. وقد برهن هذان النوعان من الرنا المرسال على أنهما أكثر من مجرد شيئين غريبين نادرين؛ ذلك أن أعضاء فريقنا البحثي، ومجموعات

(1) stretch.

بحثية أخرى، تعرفوا بسرعة **محولات رناوية** RNA switches **طبيعية** استجابت لتنوعات أخرى من **المستقلبات** metabolites الخلوية الأساسية. وكانت هذه المحولات كامنة في المراجع العلمية.

لقد ثبت في النهاية أن تسلسلا مشتركا مع أقارب للبكتيرة من *العَصَوِيَّة الرقيقة* *B.subtilis* هو محول ريبي يتعرف تميم الإنزيم SAM (S-أدينوزيل مثيونين S-adenosylmethionin). ومن جهة أخرى، عُرف أن عنصرا رناويا يصادف في رسائل ـ تركيب ونقل تميم الإنزيم **فلافين الوحيد النكليوتيد** (الڤيتامين B_2 flavin mononucleotide، وهو أيضا محول ريبي آخر. ويعتقد أن مقطعا من الرنا المرسال يكود پروتينا يراقب الحمض الأميني «ليسين» في الإشريكية القولونية يشكل، في حقيقة الأمر، قطعة من **معقد أيتامير الليسين** lysine aptamer complex الذي ينظم تركيب هذا الحمض الأميني في طيف واسع من البكتيرات. وخلاصة القول: إن المحولات الريبية هي شكل واسع الانتشار من أشكال التحكم الجيني.

المحولات الريبية والهندسة الارتدادية[*]

تم حتى الآن تعرف دزينة من صفوف المحولات الريبية، عُرفت عن طريق بنية أيتاميراتها (ملتماتها) ومع أنها تختلف فيما بينها في بعض سماتها وآليات عملها: فإنها تتشارك في مبادئ عامة قليلة. فالمحولات الريبية هي نسخ من رسائل رناوية؛ قادرة على تنظيم تعبير جيناتها الخاصة بتقريرها فيما إذا كان على الرسالة المحتواة فيها أن تترجم إلى پروتين أو يجب تدميرها قبل أن يقرأها الريبوسوم. ويتخذ المحول الريبي هذا القرار بضبط ومراقبة احتياج الخلية للپروتين الذي يُكَوِّده من خلال مقدرته على تحسس مستقلَب مستهدف، ثم تغيير تركيبه الثلاثي الأبعاد استجابة لذلك. فالمحول الريبي يحتوي إذًا على قطعتين مهمتين: تسلسل أيتامير الذي يتحسس المستقلَب، وتسلسل قطاعه التنظيمي المتضمن برنامج التعبير الجيني.

ويعمل أيتامير مستقبلا معقدا لمستقلب واحد نوعي ذي جزيء صغير. ولجميع أيتاميرات أفراد الصف الواحد لب له البنية نفسها؛ حتى في الكائنات الحية البعيدة بعضها عن بعض تطوريا. ويمكن لتسلسل برنامج التعبير الجيني، الذي قد يشمل أيضا جزءا من تسلسل أيتامير نفسه، أن يحتوي على التسلسلات التي تعيد تنظيم بنيتها الذاتية كي تؤثر في التعبير الجيني [انظر المؤطر في الصفحتين 50 و 52].

وتجدر الإشارة إلى أن المحولين الريبيين للڤيتامينين B_{12} وB_1 اللذين كنا أول من قام باكتشافهما: يمتلكان برنامج تعبير جيني يمنع استهلال الترجمة، وذلك بأن يعمدا بنفسيهما إلى تغيير شاكلتيهما كي يخبئا في طياتهما التسلسلات التي يحتاج إليها الريبوسوم ليتعرف مثلا أمرا صحيحا بقراءة الرسالة. وهنالك أمثلة أخرى على محولات ريبية تحتوي على هذه الأيتاميرات نفسها؛ تمتلك برنامج تعبير جيني يتسبب بإنهاء مُبتسر (قبل الأوان) لانتساخ الرنا المرسال عن طريق تشكيل دبوس شعر يعمل على خط فاصل **مُنْهٍ** terminator.

ومع تعاظم معارف فريقنا البحثي عن المحولات الريبية، أخذنا نثمن أكثر فأكثر كيف أن التطور وازن بحذر بين التأني والاندفاع اللذين شكلا جوهر آلية عمل المحولات الريبية. فمثلا، يجب أن يحدث تمييز المستقلبات داخل الخلية في خلال مجرد ثوان قليلة: وهو الزمن الذي يحتاج إليه الپوليميراز كي ينتسخ التسلسل الموجِّه للرنا المرسال، ولترتبط به الريبوسومات وتشرع في الترجمة. لذا، فإن سرعة ارتباط المستقلبات، وليس بالضرورة قوة هذا الارتباط، أصبحت حاسمة لتحديد في ما إذا كان محول ريبي ما يستطيع أن يتحسس هدفه. فتسلسل التوقيت بين الأيتامير وبرنامج التعبير الجيني، الذي يجعل الپوليميراز يتوقف عن الانتساخ توقفا وجيزا، ضروري أحيانا لإحداث تأخير يتيح للأيتامير وقتا كافيا كي يأسر مستقلبًا ويعيد تنظيم برنامج تعبيره الجيني كما ينبغي.

عندما بدأنا بمسح جينومات بكتيرية بغرض البحث عن نماذج جديدة من المحولات الريبية، وجدنا أنه مازالت هناك مفاجآت أكثر

أهداف مغرية[**]

إن عددا كبيرا من البكتيرات، بما في ذلك المُمْرضات البشرية المبينة أدناه؛ يستعمل المحولات الريبية كي تضبط فاعليات جيناتها الخاصة بها. لذا، يمكن للعوامل التي تستثير تلك المحولات الريبية أن تعمل كصفوف جديدة من المضادات الحيوية، وبخاصة إذا كانت العقاقير تُبطل وظيفة جينات أساسية لفَوْعة (ضراوة) الكائن الحي أو لبُقياه. وقد أدرج أدناه عدد صفوف المحولات الريبية التي توجد في كل كائن حي، وعدد الجينات التي يُعرف بأنها تُنَظَّم من قبل المحولات الريبية. وقد وضعت العلامة * فوق العدد للدلالة على أن جينة حيوية واحدة على الأقل تُنظَّم بوساطة محول ريبي.

ممرض بكتيري بشري	صفوف محولات ريبية	أعداد الجينات التي يتم تنظيمها
Acinetobacter baumannii	4	6
Bacillus anthracis	9	82
Brucella melitensis	5	21*
Enterococcus faecalis	7	17
Escherichia coli	4	15*
Francisella tularensis	4	8
Hemophilius influenzae	5	15*
Helicobacter plyori	1	2
Listeria monocytogenes	9	49
Mycobacterium tuberculosis	3	13
Pseudomonas aeruginosa	3	27
Salmonella enterica	3	34*
Staphylococcus aureus	8	30*
Streptococcus pneumoniae	5	19
Vibrio cholerae	5	13
Yersinia pestis	3	11

(*) Reverse-Engineering Riboswithces
(**) Tempting Targets

فقد تعرفنا في جينوم *العضوية الرقيقة* وحدها ثمانية تسلسلات جديدة تحمل تواقيع المحولات الريبية. وكان واحد منها يحمل أپتاميرًا مزدوجًا؛ يعمل على تشغيل التعبير الجيني أكثر من عمله على إيقافه. كما ثبت أن بنية أخرى لا تعمل كمحول ريبي فحسب؛ بل أيضا كريبوزيم تستثيره المستقلبات. وعوضا عن أن يبادر هذا الجزيء إلى إعادة تراتب شاكلته بنيويا، فإن برنامج تعبيره الجيني يشطر في الجوهر نفسه ذاتيا، ويتلف نفسه بنفسه قبل أن تتم ترجمة رسالته.

إن صفا واحدا فقط من صفوف المحولات الريبية التي اكتُشفت حتى الآن لوحظ في الكائنات الحية العديدة الخلايا؛ أما الصفوف الباقية، بحسب علمنا، فقد عُثر عليها في البكتيرات فقط. إن لجينومات الكائنات الحية الأعلى وسائل تنظيم جيني أكثر تعقيدا من البكتيرات؛ كما أن المسلك من النسخة الأصلية (الجينة) إلى الپروتين أكثر التواء. وعوضا عن نسخ ضوئية أنيقة من الرنا المرسال فإن نسخ المسودات الأولى للجينات غالبا ما تشمل فقرات (تسلسلات) طويلة من المتن غير المكوِّد، تعرف **بالإنترونات** introns، يجب **إزالتها بالتجديل** spliced out قبل أن تبدأ ترجمة الرسالة إلى پروتين. لقد عثرنا على محول ريبي في قاع حجرة تنقيح متن الرسالة.

يُصادَف أپتامير تميم الإنزيم B_1 في تسلسلات الإنترونات ضمن أوپيرونات تركيب التيامين في الكثير من الفطور والنباتات؛ بما في ذلك الأرزّ. وعندما يترابط بالثيامين B_1، فإن هذه المحولات الريبية تبدو وكأنها تسبب إعادة تنظيم بنية الرنا حول وصلات (مواصل) الإنترونات فتمنع التجديل من البدء (الإنجاز). ولما كانت تفاصيل هذه السيرورة غير واضحة؛ فإن ذلك قد يحول الرسالة برمتها إلى سلة المهملات أو يمنعها من الارتحال إلى المكان الصحيح في الخلية حيث تتم ترجمتها.

ومما يثير الاهتمام أنه عثر على عقّار معروف يعمل مضادا فطريا، ويرتبط إليه في الوقت نفسه المحول الريبي للثيامين B_1. وتقترح الأدلة أن هذا الارتباط يخدع الفطر كي يعتقد أن لديه ما يكفي من الثيامين B_1، وهذا يتسبب في وقف تركيب المزيد منه. ولأن الفطر لا يمتلك فعلا هذه المغذية المهمة، فإن نموه يتباطأ، ويمكن أخيرا أن يموت نتيجة عَوَز هذا الثيامين. وكما يوضح هذا المثال، فإن المحولات الريبية تعمل كمنظمات حيوية لإمدادات من المغذيات الحاسمة الخاصة بطيف واسع من الميكروبات التي تصنع أيضا أهدافا مغرية لمضادات حيوية جديدة.



هنالك فقط كِسَر وقطع صغيرة من عالَم الرنا المنسي تبدو اليوم موجودة بين ظهرانينا.

ويعرف حاليا أكثر من دزينة من المُمْرضات البشرية التي تعتمد على تنظيم المحولات الريبية لكثير من المستقلَبات المهمة *(انظر المؤطر في الصفحة المقابلة)*. ويجتهد كثير من الباحثين كي يعثروا على جزيئات تخدع أپتاميرات المحولات الريبية البكتيرية؛ لتحسبها عن طريق الخطأ مستقلبات طبيعية، فتستثير بهذه الطريقة استجابة تنظيمية جينية ستكون ضارة بالخلايا البكتيرية.

وتستكشف أيضا بعض المجموعات البحثية الفكرة وراء استعمال محولات ريبية صنعية لضبط فاعلية الجينات داخل الخلايا الحية: في مجال المعالجة الجينية مثلا. وتمثل الهدف بتصميم **محول تشغيل-إيقاف** on-off switch يُستثار عن طريق جزيء حميد شبيه بالعقار ثم يدمج المحول داخل جينة علاجية وعندئذ يمكن غرز هذا البناء الجيني في خلايا المريض؛ كما يمكن تنظيم فعله بأن يُعطى الشخص المعالج حبات دوائية تحتوي على الجزيء الذي يُفعّل المحول الريبي المصمم. وكما هي الحال في تطبيقات المضادات الحيوية، فإن هذا الاستعمال للمحولات الريبية لا يزال في مراحل البحث المبكرة.

إن الشعور العام المتمثل بالمفاجأة والإثارة ـ والذي استُلهم من اكتشاف الريبوزيمات، والجهود المبذولة للإفادة من هذه الجزيئات القديمة في تطبيقات حديثة ـ قد يجدد الوجود الفعلي للمحولات الريبية. فهنالك فقط كِسَر وقطع من عالم الرنا المنسي تبدو موجودة اليوم بين ظهرانينا. ولكن هذه الأدوات الرناوية بآلياتها المعقدة وأدوارها التنظيمية تشبثت بالحياة تشبثا عنيدا كي تستمر في الكائنات الحية المعاصرة. ولا يسعنا إلا أن نتساءل عما إذا كانت المحولات الريبية هي آخر آثار عالم الرنا التي تصادف اكتشافها، أم إن هنالك جزيئات أولية أخرى لا تزال تستعملها مصانع المُستقلَبات، أو الأدوار التنفيذية للخلايا الحديثة ـ ربما أيضا في خلايانا البشرية ذاتها ـ وتنتظر من يكتشفها. ■

المؤلفان

J. E. Barrick - R. R. Breaker

بحثا معا في تنوع وأهمية المحولات الريبية وذلك في مختبر «بريكر» بجامعة ييل. «باريك» حاليا زميل لما بعد الدكتوراه في جامعة متشيگان، حيث يدرس تطور البكتيرات، إضافة إلى برامج الحاسوب الذاتية التضاعف (التنسّخ). وتستمر مجموعة «بريكر» في استكشاف طبيعة الحموض النووية واستعمالاتها، وجزئيا بإنشاء عناصر ضبط جيني مصمم مصنوعة من الرنا، وكذلك تطوير مضادات حيوية لاستهداف محولات ريبية طبيعية.

مراجع للاستزادة

The Origin of Life on the Earth. Leslie E. Orgel in *Scientific American*, Vol. 271, No. 4, pages 52–59; October 1994.

Thiamine Derivatives Bind Messenger RNAs Directly to Regulate Bacterial Gene Expression. Wade Winkler, Ali Nahvi and Ronald R. Breaker in *Nature*, Vol. 419, pages 952–956; October 31, 2002.

Metabolite-Binding RNA Domains Are Present in the Genes of Eukaryotes. Narasimhan Sudarsan, Jeffrey E. Barrick and Ronald R. Breaker in *RNA*, Vol. 9, No. 6, pages 644–647; June 2003.

Riboswitches as Antibacterial Drug Targets. Kenneth F. Blount and Ronald R. Breaker in *Nature Biotechnology* (in press).

Scientific American, January 2007



طرق أفضل لاستهداف الألم[*]

حاز <B. ساموليلسون> جائزة نوبل في الفيزيولوجيا أو الطب عام 1982، وذلك عن أبحاثه في تقديم صورة دقيقة عن الكيفية التي يولِّد بها الجسم البروستَكلنديناتprostaglandins. وهذه المواد الشبيهة بالهرمونات تؤدي دورا في تنظيم عدد من السيرورات البيولوجية، بما في ذلك التحريض على الألم والحرارة والالتهاب. ومن المعروف أن هذه السيرورات تُثبَّط من قبل الأسپرين والايبوپروفن والأدوية المشابهة لهما. وقد أجرى <ساموليلسون> أبحاثه هذه، بالتعاون مع <S. برگستروم> [وهو شريك في جائزة نوبل للعام نفسه (1982)]، في حرم معهد كارولينسكا المعروف بآجره الأحمر في السويد، وهذا المعهد يقوم أيضا باختيار الفائز بجائزة نوبل السنوية في الطب.

إن لمعهد كارولينسكا تاريخا طويلا مع البروستكلنديات، يعود إلى عام 1935 عندما اكتُشفت مشتقات هذه الأحماض الدهنية، ويمتد إلى يومنا الحاضر. لقد قام <ساموليلسون> ومساعدوه في السنوات الأخيرة بأبحاث أكثر تفصيلا عن التركيبة البيوكيميائية للبروستكلندين تُستَغلُّ حاليا في محاولة لتطوير أدوية قاتلة للألم ومضادة للالتهاب أكثر أمانا من المواد المتوافرة حاليا، بما في ذلك المجموعة التي تشوهت سمعتها حديثا والمعروفة بالمثبطات COX-2. ويُعلق على ذلك <ساموليلسون> قائلا: «هناك طلب هائل على الأدوية المضادة للالتهاب، وإذا تمكنا من تطوير دواء له نفس فعالية العقاقير السابقة، لكن مع تأثيرات جانبية أقل، فإن هذا الأمر يغدو من الأهمية بمكان.»

الشجرة والفروع[**]

في البيان الصحفي الصادر عن معهد كارولينسكا عام 1982 تم الثناء على حصول <ساموليلسون> على جائزة نوبل، واعتُرف بفضل هذا العالِم في المعرفة المتوافرة حاليا عن شجرة البروستكلندين بجميع فروعها.» لقد بيّن <ساموليلسون> أنه يتم تصنيع البروستكلندين عندما يعالِج أحد الأحماض الدهنية (**الحمض الأراكيدوني** arachidonic acid) المتواجد في غشاء الخلية بالإنزيمات وفق سلسلة من التفاعلات (*انظر المؤطر في الصفحة 56*). وتُسفر هذه التفاعلات في النهاية عن مركبات تؤمن أعمالا تنظيمية مختلفة داخل

(*) BETTER WAYS TO TARGEL PAIN
(**) The Tree and Its Branches

إن تعميق فهمنا للطرق الكيميائية التي يعمل بها كل من الأسپرين والڤيوكس، قد يؤدي إلى إنتاج أدوية لتسكين الألم ذات مضاعفات جانبية أقل.

<G. ستيكس>

الجسم، فتضمن على سبيل المثال، أن الكليتين تحصلان على تدفق كاف من الدم، أو تنظم تقلصات الرحم أثناء الولادة والحيض، أو تقدح زناد عملية الالتهاب (الذي يستدل عليه بالاحمرار والتورم) كارتكاس لحماية النسج من الخمج أو الأذى.

يقوم الأسپرين، والأدوية الأخرى المضادة للالتهاب غير الستيرويدية كالإيبوپروفن، بإيقاف مفعول الإنزيمين اللذين يعملان في أولى مراحل تشكيل الپروستگلندين: سيكلوأكسجيناز 1 و 2 (COX-1 و COX-2). وهكذا يتوقف إنتاج جميع مشتقات الپروستگلندين بكبح الإنزيمات COX.

إلا أن الأسپرين و**أقرباءه** relatives تسبب أحيانا مشكلات خاصة بها نتيجة لهذا الكبح الشديد. فعندما يقوم الأسپرين بتثبيط إنتاج الپروستگلندين المسؤول عن الالتهاب، فإنه يقوم في الوقت ذاته بتثبيط عمل واحد أو أكثر من مشتقات الحمض الأراكيدوني التي تحمي بطانة المعدة من حمض كلور الماء الموجود في العصارات الهضمية. وفي عام 1990 قامت شركات الأدوية بإجراء تصحيحي عندما أنتجت الدواءين ڤيوكس Vioxx وسليبركس Celebrex وأدوية أخرى تقوم بشكل خاص بحجب الإنزيم COX-2، بحيث تُترك سليمة بعض الپروستگلندينات الخاصة بحماية المعدة والتي تُفرَز استجابة لفعالية الإنزيم COX-1.

إلا أنه اتضح أن إعاقة الإنزيم COX-2 لها عواقبها الخاصة به. فهذا التعطيل على ما يظهر يوقع الفوضى في سلسلة من التفاعلات المعقدة بين الپروستگلندينات. فمع أن إيقاف عمل الإنزيم هذا ينقص من تصنيع **الپروستگلندين** E_2 (PGE_2)(*) الذي يعتقد أن له دورا رئيسيا في تحفيز الألم والالتهاب، إلا أنه يخفّض كذلك من تصنيع **الپروستاسايكلين**(*) PGI_2، وهو پروستگلندين واق للقلب يقوم بتوسيع الأوعية الدموية ويمنع الصفيحات من التكدس (أي إنه يقاوم التخثر). وهذا التخفيض قد يتسبب في نتائج خطيرة.

في عام 1999، ذكر <G. فيتزجيرالد> [من المركز الطبي بجامعة پنسلڤانيا] في تقرير له نشر في «وقائع جلسات الأكاديمية الوطنية للعلوم بالولايات المتحدة الأمريكية» عن تجربة سريرية صغيرة أوضحت ظاهرة تثبيط PGI_2. وبيّن <فيتزجيرالد> كذلك أنه عندما ينقص PGI_2 بعد تناول مثبط الإنزيم COX-2، فإن الثرومبوكسان thromboxane، وهو نوع آخر من الپروستگلندين يتم إنتاجه في أقنية الحمض الأراكيدوني، يبقى فعالا ويحث على انقباض الأوعية وتكتل الصفيحات ـ الأمر الذي عادة ما يعاكسه PGI_2. وأوضح التقرير أن عدم التوازن هذا قد يشجع على تشكل **الخثرات** thrombosis التي قد تؤدي إلى الهجمات القلبية والسكتات ـ وهو استنتاج المحامين في دعاوى قضائية ذاعت أخبارها وقد أثيرت في السنوات الأخيرة ضد مصنّعي الأدوية

(*) سنرمز فيما يلي للپروستگلندين E_2 بالرمز PGE_2 وسنرمز للپروستاسايكلين بالرمز PGI_2.

كيف ننتج أدوية أفضل من الأسبرين والفيوكس(*)

إن أحد مسببات الألم والالتهاب والحرارة في الجسم هو إنتاج كميات كبيرة من جزيء يدعى پروستگلندين E_2 (PGE_2) (*الخطوات 1-3 في الشكل*) من قبل خلايا الالتهاب. يعمل الأسپرين Aspirin والڤيوكس Vioxx وأنواع أخرى من الأدوية القاتلة للألم على تثبيط الإنزيمات التي تحفز تصنيع البروستكلندين (*المؤطران في الأعلى*). ولكن بعض أنواع البروستكلنديات والمواد الأخرى التي تنتجها هذه الإنزيمات هي مواد مفيدة، ويؤدي توقيف إنتاجها إلى مضاعفات جانبية. ولهذا فإن العاملين على تطوير الأدوية يدرسون وسائط جديدة، مثل مثبطات الإنزيم mPGES-1، التي تعيق فقط تركيب كميات زائدة من الإنزيم PGE_2، وبذلك تسمح بتصنيع المواد المفيدة (*المؤطر السفلي*).

كيف يعمل الأسپرين

يقوم الأسپرين والأدوية اللاستيرويدية المضادة للالتهاب بإعاقة عمل كل من الإنزيمين COX-1 و COX-2، مما يثبط إنتاج كافة أنواع البروستكلندين، بما في ذلك المفيدة منها.

كيف تعمل مثبطات الإنزيم COX-2

يسبب الإنزيم COX-2 الألم والالتهاب عن طريق رفع مستويات البروستكلندين PGE_2 عبر طرق تشمل إنزيما يدعى mPGES-1، وبإعاقة الإنزيم COX-2 بواسطة أحد الأدوية (ڤيوكس Vioxx أو سيليبركس Celebrex أو بيكسترا Bextra أو غيرها من المثبطات)، توقف هذا الارتفاع في مستوى PGE_2. ويبقى تهديد هذه الأدوية بأذى المعدة قليلا، لأن من المفروض أن يبقى PGE_2 يُصنع بكميات عادية بتوجيه من الإنزيم COX-1 وإنزيم آخر يدعى cPGES. إلا أن مثبطات الإنزيم COX-2، تقلل أيضا من مستوى البروستكلندين PGI_2 الذي يحمي الجهاز الوعائي. وهذا التدني قد يفسر ارتفاع نسبة حوادث الهجمات القلبية والسكتات لدى أولئك الذين يتناولون هذه الأدوية.

كيف تعمل مثبطات الإنزيم mPGES-1

هذه الوسائط التي ما تزال قيد التطوير، تعيق عمل mPGES-1 بشكل خاص، وهو الإنزيم الذي ينتج بكميات كبيرة بإيعاز من الإنزيم COX-2 في الخلايا التي ترتكس لأذى الالتهاب. وقد يفيد إنقاص الإنزيم m PGES-1 لوحده دون الإنزيمات المسؤولة عن تصنيع كميات طبيعية من البروستكلنديات، في التحكم بمستويات PGE_2 في الجسم، وبذلك يؤدي إنقاص هذا الإنزيم إلى الخلاص من الألم دون إلحاق أذى بالقلب وجهاز الهضم.

1 وتقوم معظم الخلايا بشكل روتيني بتصنيع البروستكلندين من خلال تفاعلات تبدأ بإنزيم يدعى COX-1 ويعمل على الحمض الأراكيدوني Arachidonic acid. فعندما يتعرض أحد النسج لأذية حادة، تعطى إشارة كيميائية إلى الخلايا البلعمية وإلى خلايا التهابية أخرى في المناطق المجاورة لمكان الإصابة لزيادة نشاط الإنزيم COX-2 الذي يؤثر أيضا في الحمض الأراكيدوني.

2 يقوم الإنزيمان COX-1 وCOX-2 بتحويل الحمض الأراكيدوني في تفاعل مرحلي إلى مركب كيميائي وهو البروستكلندين E_2 (PGE_2).

3 عقب ذلك، تقوم إنزيمات إضافية بتحويل البروستكلندين PGH_2 إلى پروستكلنديات أخرى وإلى ثرومبوكسان، بحيث يكون لكل منها وظيفة خاصة بها (*أسفل الشكل*). وفي النهاية تنطلق جميع البروستكلنديات - بما في ذلك PGE_2 الذي ينتج الألم - لتؤثر في الخلايا الأخرى.

إشارة التهابية
ليبيدات
الحمض الأراكيدوني
الإنزيم COX-1
الإنزيم COX-2
PGH_2
الإنزيم cPGES-1
الإنزيم cPGES
إنزيمات
PGE_2 PGI_2 TXA_2 PGF_2 PGD_2

البروستكلنديات وتأثيراتها المختلفة

البروستكلندين D_2 (PGD_2)
له تأثير في تنظيم النوم والارتكاسات التحسسية.

البروستكلندين F_2 (PGF_2)
يقوم بضبط تقلصات الرحم أثناء المخاض والحيض.

الثرومبوكسان A_2 (TXA_2)
يحرض انقباض الأوعية الدموية ويحث الصفيحات على الارتصاص (التخثر).

البروستكلندين I_2 (PGI_2)
يوسع الأوعية الدموية ويثبط ارتصاص الصفيحات (التخثر)، وقد يحمي من التصلب العصيدي ومن أذية بطانة المعدة.

البروستكلندين E_2 (PGE_2)
له علاقة بالألم والالتهاب والحرارة، ويحمي من أذية المعدة.

(*) Improving on Asprin and Vioxx

المثـــبطة للإنزيم COX-2. وقــــد بدأ «فيتزجيرالد» بتقديم تقارير عن اكتشافاته في المؤتمرات عــام 1997، أي قـبل سنة من الموافقة على أول مثبط الإنزيم COX-2، وهو الدواء سيليبركس Celebrex.

وعندما كانت مجموعة «فيتزجيرالد» تكشف عن إشارات التحذير الأولية بالأخطار المشار إليها، كانت مجموعة «ساموليسون» للأبحاث تجهد «لوضع ورقة جديدة» على أحد فروع شجرة البروستكلندين. فقد تزعَّم أحد الزملاء المتخرجين في مختبر «ساموليسون»، ويدعى «J.-P. جاكوبسون»، مشروعا اكتشف من خلاله النسخة البشرية للإنزيم الذي ينتج PGE_2، وانتهى ملخص البحث الذي نشر عام 1999 والذي شارك فيه «جاكوبسون» و«ساموليسون» وباحثون آخرون بعبارة مشجعة تقول إن الإنزيم المكتشف «هو هدف جديد ممكن لتطوير الأدوية.»

وقد استرعت هاتان المقالتان انتباه عالمين من معهد كارولينسكا كانا قد أنشأ شركة صغيرة أسمياها بيوليبوكس Biolipox. وكانت هذه الشركة قد فتحت أبوابها في عام 2000 لتطوير أدوية مضادة للالتهاب في أمراض التنفس عن طريق معالجة صنف من المركبات البيوكيميائية (الكيمياوية الحيوية) اكتشفت حديثا تدعى إيوكسينات eoxins، وهي مشتقة أيضا من الحمض الأراكيدوني. وقررت الشركة بعد سنة أن تنوع منتوجاتها، فحصلت من معهد كارولينسكا على رخصة الحماية الفكرية للإنزيم المسمى **الإنزيم التركيبي للپروستكلندين E الجسدي الميكروي**[1] (mPGES-1). هذا وإن أي دواء يعيق انتقائيا تصنيع الإنزيم لـ PGE_2، يمكن أن يوقف الألم والالتهاب من دون تأثيرات جانبية هضمية أو قلبية وعائية، لأنه لن يخفض من مستويات PGI_2. وتقول «Ch. إيديتوس» [المسؤولة العلمية الرئيسية في الشركة بيوليبوكس]: «لقد أدركنا أنه من الممكن أن يكون هذا مفيدا كجيل ثالث من مضادات الالتهاب اللاستيرويدية.»

تحرير المثبطات[*]

تقع الشركة بيوليبوكس اليوم في بناء غير مميز يحتوي أيضا على المكتبة العلمية وقسم المعلوماتية البيولوجية والأقسام التدريسية التابعة لحرم معهد كارولينسكا وقد عُيّن «ساموليسن» مستشارا علميا وعضوا في مجلس إدارة هذه الشركة. وعقدت الشركة بوهرينگر إينگلهيم Boehringer Ingelheim، التي تُصنّع دواء موبيك Mobic المثبط للإنزيم COX-2، اتفاقية مع الشركة بيوليبوكس عام 2005 لتمويل الأبحاث المتعلقة بالإنزيم mPGES-1، ومن ثَمّ الترخيص للمثبطات الجديدة من حيث التطوير النهائي والتسويق.

والسوق الأمريكي، الذي يستوعب سنويا ما ينوف ثمنه على العشرة بلايين دولار من الأدوية القاتلة للألم غير المخدرة، متحدا مع فادحة الإنزيم COX-2، جعل شركات أخرى توجّه اهتماما كبيرا للإنزيم. فقد نشرت الشركة ميرك دراسة عن مثبطات الإنزيم mPGES-1، وتقدمت الشركة فايزر pfizer بطلب براءة اختراع لفأر سُحبت منه الجينة المسؤولة عن عمل الإنزيم mPGES-1، الأمر الذي يساعد على فحص تأثيرات تثبيط هذا الإنزيم. كما تقدمت شركات أدوية كبيرة للحصول على براءات اختراع متعلقة بالإنزيم mPGES-1. ويعلق «فيتزجيرالد» على كل هذا قائلا: «إن صفائح الأرض تتزحزح. فهناك اليوم سوق هائل لأدوية جديدة بسبب عدم الضمانة التي تتصف بها الأدوية المتوافرة حاليا.» وأضاف قائلا: «إن إحدى الشركات، التي لا يمكنني الكشف عن اسمها، تخطط للقيام في عام 2007 بتجارب بشرية سريرية خاصة بمثبط الإنزيم mPGES-1.» (وبشكل مستقل، تحاول شركات مصنعة أخرى تطوير أدوية تتحد مع مستقبلات PGE_2 وتقوم مباشرة بإعاقة عملها).

إن المحن التي تعرض لها الدواء فيوكس قد تعيق الإسراع في تقديم أي دواء جديد مضاد للالتهاب إلى الأسواق. وفي الواقع، قام المشككون برفع أصواتهم. ففي عام 2006 نُشرت مقالة في مجلة «*الاتجاهات الجديدة في العلوم الدوائية*»[2] عنوانها: «*هل الإنزيم mPGES-1 هدف واعد في علاج الألم؟*». وقد أثارت إشكالية ما إذا كانت سيرورات الاستقلاب (الأيض) المعقدة للبروستكلندين ستحبط مساعي الوصول إلى دواء جديد. وورد في المقالة ملاحظة أن تثبيط الإنزيم mPGES-1 قد يخفض من إنتاج PGE_2، ولكنه قد يؤدي إلى إنتاج أعلى من نوع آخر من البروستكلندين، مع حدوث نتائج فيزيولوجية غير معروفة. ثم إن معظم أنواع البروستكلندين الأخرى، وليس فقط PGE_2، تؤدي بعض الدور في إثارة الألم.

والتجارب السريرية الخاصة بتقدير درجة الأمان والفعالية على الجنس البشري هي وحدها القادرة على حل أي خلاف حول هذه المسألة. لكن الدراسات الأولية على الفئران التي أُزيل من أجسادها الإنزيم PGES-1 تعطي بعض الأمل. وقد ذُكر في أحد التقارير الصادرة عن مجموعة «فيتزجيرالد» لعام 2006 أن الفئران التي نُزع منها الإنزيم mPGES-1 زادت فيها مستويات PGI_2 المريحة للقلب، فيما ظل ثابتا مستوى الثرومبوكسان thromboxane الضار، وفي الوقت نفسه، بقيت قدرة الدم على التخثر وضغط الدم طبيعيين. وأوضحت دراسة لاحقة قام بها فريق «فيتزجيرالد» أن حذف الإنزيم mPGES-1 قدم عددا من الفوائد الوعائية القلبية، ربما بسبب تنشيط PGI_2.

وتستمر التجارب للحصول على مركبات تكرر تأثير إخماد الإنزيم mPGES-1. وقد بدأت الاستعدادات للقيام بالخطوة الحساسة التالية، وهي الانتقال من التجارب على الفئران إلى الإنسان. ■

(*) Unleashing Inhibitors
(1) microsomal prostoglandin E synthase
(2) *Trends in Pharmacological Sciences*

مراجع للاستزادة

Identification of Human Prostaglandin E Synthase: A Microsomal, Glutathione-Dependent, Inducible Enzyme, Constituting a Potential Novel Drug Target. Per-Johan Jakobsson, Staffan Thorén, Ralf Morgenstern and Bengt Samuelsson in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Vol. 96, No. 13, pages 7220–7225; June 22, 1999.

Is mPGES-1 a Promising Target for Pain Therapy? Klaus Scholich and Gerd Geisslinger in *Trends in Pharmacological Sciences*, Vol. 27, No. 8, pages 399–401; August 2006.

Deletion of Microsomal Prostaglandin E Synthase-1 Augments Prostacyclin and Retards Atherogenesis. Miao Wang, Alicia M. Zukas, Yiqun Hui, Emanuela Ricciotti, Ellen Puré and Garret A. FitzGerald in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Vol. 103, No. 39, pages 14507–14512; September 26, 2006.

Scientific American, January 2007

الأفلام السينمائية في عيوننا(*)

تعالج الشبكية معلومات تفوق كثيرًا ما تخيَّله أي شخص على الإطلاق، بحيث تُرسِل دستة أفلام سينمائية مختلفة إلى الدماغ.

<F. ويربلين> ـ <B. روسكا>

كثيرًا ما نأخذ قابلياتنا الإبصارية المذهلة كأمر مسلَّم به، بحيث لا يتوقف إلا قليل منا متفكرًا في الكيفية التي نحقق بها الرؤية فعليًا. ولعدة قرون، ربط العلماء بين آلة المعالجة الإبصارية وآلة التصوير التلفازية؛ إذ تركِّز عدسة العين الضوء الداخل على **صفيف**(1) من المستقبلات الضوئية في الشبكية. وتحوِّل هذه المكاشيف الضوئية تلك الفوتونات بطريقة سحرية إلى إشارات كهربائية، يجري إرسالها على طول العصب البصري إلى الدماغ لمعالجتها. ولكن التجارب الحديثة التي أجريناها نحن الاثنين وغيرنا، تشير إلى أن هذه المضاهاة الوظيفية غير كافية. فالشبكية تقوم في الواقع بإجراء كم هائل من سيرورات المعالجة في داخل العين مباشرة، ومن ثمّ تُرْسَل سلسلة من **العروض** representation الجزئية إلى الدماغ لتفسيرها.

لقد توصلنا إلى هذا الاستنتاج المدهش بعد قيامنا باستقصاء شبكيات عيون الأرانب المشابهة بشكل رائع لشبكيات عيون البشر. [وقد أدى عملنا على شبكيات عيون حيوانات السلمندر، وهو نوع من الضفدعيات، إلى نتائج مماثلة]. إن الشبكية فيما يبدو هلالٌ بالغ الصغر من مادة دماغية جرى إبعادها إلى محيط الجسم من أجل أن تحظى باتصال مباشر مع العالم الخارجي. ونتساءَل هنا كيف تُركِّب الشبكية العروض التي ترسلها؟ وكيف تبدو هذه العروض عندما تصل إلى المراكز الدماغية الإبصارية؟ وكيف تنقل تلك العروض الثراء الضخم للعالم الحقيقي؟ وهل تضفي هذه العروض أي معان تساعد الدماغ على تحليل مشهد ما؟ هذه التساؤلات هي مجرد بعض الأسئلة الملحة التي شرع بحثنا في الإجابة عنها.

لقد وجدنا أن خلايا عصبية متخصصة (أو عصبونات) قابعة عميقًا داخل شبكية العين، تقوم بإرسال ما يُعتقد بأنه دستة **مسارات** tracks من أفلام سينمائية (بمعنى **مستخلصات متميِّزة** distinct abstractions من العالم المرئي). ويجسد كل مسار بيانًا ابتدائيًا لأحد جوانب المشهد الذي تواصل الشبكية تحديثه وإرساله إلى الدماغ. فعلى سبيل المثال، ينقل أحد المسارات صورة تشبه الرسم التخطيطي، بحيث لا تحدد إلا حافات الأشياء؛ في حين يستجيب مسار آخر للحركة التي غالبًا ما تكون ذات توجيه معين. كما تحمل بعض المسارات الأخرى معلومات حول الظلال والإنارات. هذا ولا يزال من الصعب تصنيف بعض العروض الأخرى في أبواب تخصُّها.

يتم نقل كل مسار بواسطة حشد من الألياف تخصُّه ضمن العصب البصري إلى المراكز العليا في الدماغ، حيث يحدث المزيد من سيرورات المعالجة الأكثر تعقيدًا. [وللجهاز السمعي البشري كذلك بنيان مماثل، إذ ينقل كل عصب سمعي معلومات تخصُّ مجالاً محدودا جدا من طبقات الصوت pitches، ثم يقوم الدماغ بعد ذلك بتجميعها معا]. لقد بين الباحثون الذين يدرسون القشرة الإبصارية أن الصفات المختلفة (مثل: الحركة واللون والعمق والشكل) تُجرى معالجتها في مناطق مختلفة من الدماغ، وأن إصابة منطقة معينة يمكن أن تسبب عجزًا في حس وإدراك وفهم صفة محددة ما. ولكن مقدرة الدماغ على مجرد استكشاف مثل هذه الصفات إنما تنشأ في المقام الأول في **الأفلام السينمائية الشبكوية** retinal movies.

تبيِّن الأشكال في الصفحات التالية أفضل تفسيراتنا فيما يخصُّ الكيفية التي تقوم بها الشبكية بابتداع الصور الكهربائية **السريالية** surreal التي تخبر الدماغ بالمعلومات. وبمتابعة بحثنا سنبدأ بإلقاء بعض الضوء على الكيفية التي أنشىء وفقها كل فيلم من هذه الأفلام السينمائية، ولكننا لا نستطيع بأي حال

(*) THE MOVIES IN OUR EYES

(1) array



من الأحـوال تقـديم نموذج كـامل. هذا وتحمل الأفلام السينمائية الاثنا عشر كافة المعلومات التي سوف يستقبلها الدماغ في أي وقت لتأويل العالم المرئي. ولكننا لا نستطيع حتى الآن أن نقول كيف يتم دمج أنماطها وأشكالها. ربما كانت تلك الأفلام السينمائية تعمل **كدالات** clues أوّلية، كنوع من **السقالات** scaffolding يُشيِّد عليها الدماغ مضامينه. ولا يختلف هذا المفهوم كثيرًا عما يوصف «**بعين العقل**» mind's eye التي تُسبك كلمات رواية ما في حكاية هادفة.

ومع أن عروض الشبكية فيما يبدو تلتقط الحقائق الإبصارية لمشهد ما (كمائدة عشاء أو شلال أو وجه يتحدّث) بشكل تام، فإن هناك مكونات أساسية تبدو مفقودة. فلا شيء يتعلق بالمشاعر أو المواقف أو الحبكة أو المباغرة يظهر ماثلاً. ربما تكون تلك السمات أصيلة إلى حد ما في مسارات الأفلام السينمائية التي يترجمها الدماغ، أو ربما نكون باستخدامنا شبكيات عيون الأرانب قد فشلنا في العثور على جميع العروض التي يمكن أن تلتقطها شبكية العين البشرية ـ والمتمثلة في عروض عالية الميز يمكن أن تستخلص نعوتا كالمشاعر بطرق مازال علينا أن نكشف عنها النقاب.

ومع ذلك فمن الواضح أن **عروض الشبكية** retina's representations تشكل لغة إبصارية طبيعية. ويتمتع اليوم فهم هذه اللغة بأهمية خاصة. فثمة مجموعات بحثية على امتداد العالم تحاول إعادة حاسة الإبصار إلى المكفوفين، وذلك عبر إدخال **محسٌ** sensor صنعي أمام العصب البصري مباشرة، بحيث يقوم مقام الشبكية. لقد تقدم هذا العمل، ولكن لا تزال النتائج فجّة نسبياً. إذ لا تزال **المبثوثات** transmission تقتصر على ترجمات مبهمة للنماذج الأساسية. لقد بدأت تجارب على البشر في معهد Doheny Eye التابع لجامعة ساذرن كاليفورنيا. وثمة تجارب مماثلة على وشك الانطلاق في كلية الطب بجامعة ولاية واين. صحيح إن الهدف النهائي لهذه المحاولات بعيد المنال على الأرجح، بيد أن نجاحها يكمن أخيرًا في تزويد الدماغ بأنماط من النشاط تشبه تلك التي تزوده به الشبكية في الأحوال الطبيعية، بما في ذلك اللغة الطبيعية للرؤية. وسوف يتمثّل التحدي اللاحق في اكتشاف كيفية **شبك** hook-up كل صفة تجريدية بألياف مناسبة في العصب البصري.

إن الفهم المفصل للغة الطبيعية للإبصار التي تتكون داخل الشبكية ضروري لصنع الأجهزة **البديلة** prosthetic الناجعة. وفي الوقت نفسه سوف يساعد هذا الفهم الباحثين على تعلم المزيد عن الكيفية التي تشترك فيها العين والدماغ معًا في الرؤية بوضوح، وكيف يتم خداعهما بصريّاً، وكيف يتتبعان الأجسام السريعة الحركة، وكيف يعبِّئان الأجزاء الناقصة التي تتضمنها أي صورة معروضة على شاشات التلفاز أو الحاسوب أو سينما السيارات. ونحن نأمل أن يكون وصفنا لقدرة الشبكية على المعالجة التمهيدية هذه خطوة نحو الهدف.

نظرة إجمالية/رؤية سريالية (*)

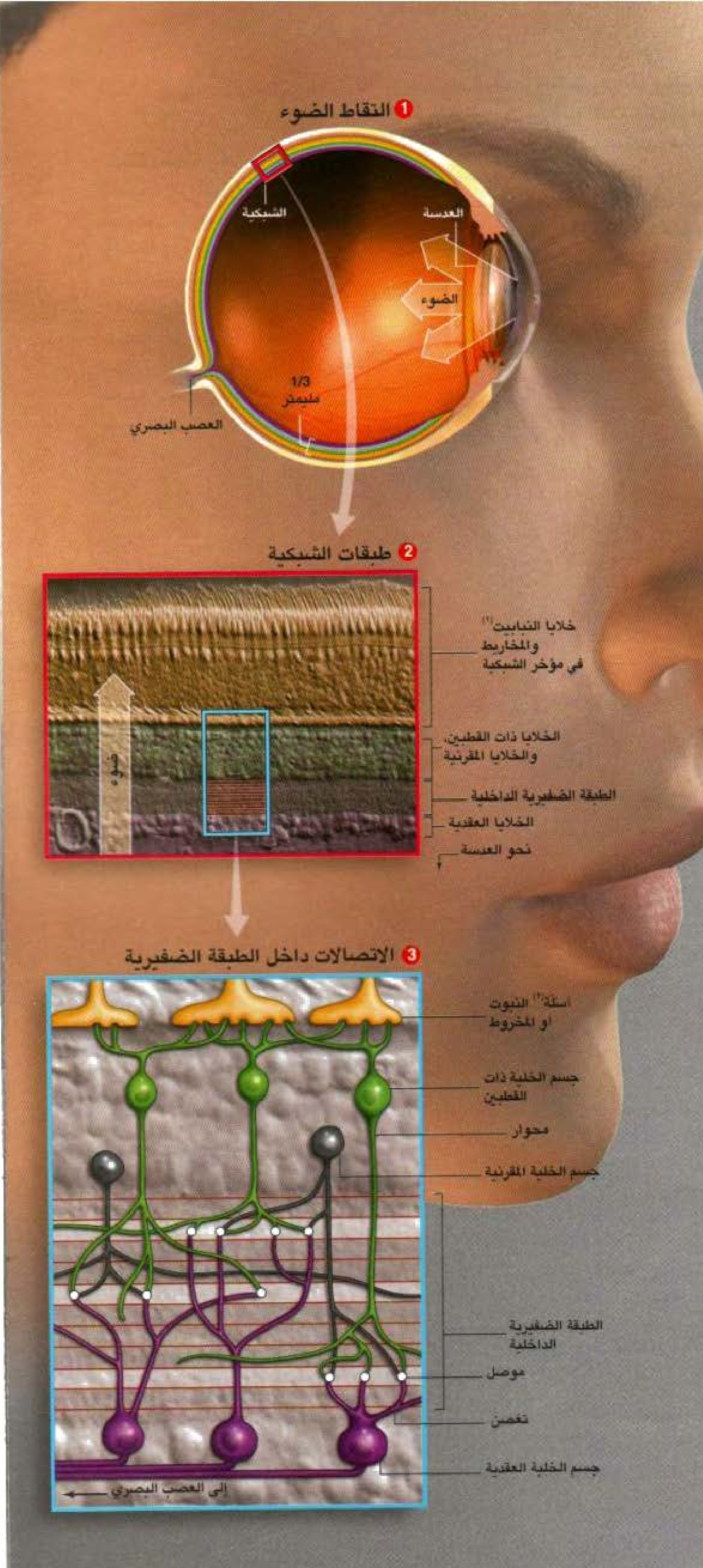
- **إن وظيفة الشبكية أكثر بكثير من مجرد تمرير إشارات بسيطة إلى الدماغ. فمن المثير للدهشة أنها تستخرج دستة عروض متميّزة لأي مشهد مرئي، وذلك على هيئة أفلام سينمائية معقدة ذات ظلال باهتة كالأشباح تولدها أنواع قليلة نسبيا من العصبونات.**
- **يستخدم الدماغ هذه العروض التجريدية لبناء عالم مرئي دقيق في التفاصيل وغني بالمعاني.**
- **إن فهم "اللغة البصرية" التي تحملها هذه الأفلام السينمائية سوف يساعد الباحثين الذين يبتدعون أجهزة إحساس بصرية صنعية قد تساعد المكفوفين على الرؤية. وينبغي أيضاً أن تدعم تلك التبصرات الجهود المبذولة لتحديد الكيفية التي ترى فيها العين والدماغ الأشياء بوضوح.**

تشريح نشيط (**)

ينشأ سلوك الشبكية المذهل من بنيتها المعقدة. لقد أضافت التجارب المضنية التي أجراها الكثير من المتخصصين تفاصيل فيزيولوجية إلى الأنموذج الكلاسيكي الخاص **بالدارّة** circuitry الشبكوية الذي فصّله أول مرة عالم التشريح الإسباني العظيم <R. S> كاجال> قبل قرن من الزمن، والذي ظل يعاد في مراجع التشريح منذ ذلك الحين إلى اليوم ❶. فالشبكية الشفافة تتألف من طبقات من العصبونات مرتبّة بشكل بديع ❷. وتضمّ الطبقة الخارجية الأكثر بعدًا عن العدسة كلاً من خلايا **النبابيت (الأعمدة)** rods **والمخاريط** cones التي تمتص الضوء الوارد إلى كليهما وتحوله إلى فعالية عصبونية. وتتصل هذه المستقبلات الضوئية بعشرة أنواع مختلفة من العصبونات تعرف بالخلايا ذات **القطبين (ثنائية القطب)** bipolar التي ترسل أذرعًا طويلة ناقلة للإشارات (تسمى محاوير) إلى طبقة مركزية «**ضفيرية داخلية**» inner plexiform. وتبدو هذه العصابة كسلسلة من عشر **نضائد (طبقات)** strata متميزة متوازية ويُوصل محوار كل خلية من أنماط الخلايا ذات القطبين إشاراته إلى قلّة من هذه النضائد فقط.

وعلى الجانب الداخلي الأقصى من الطبقة الضفيرية ❸ يوجد اثنا عشر نمطا مختلفا من **الخلايا العقدية** ganglion cells (*باللون الأرجواني*). ويرسل معظم هذه الأنواع امتدادات تشبه الأصابع تسمى **تغصنات** dendrites إلى داخل نضيدة واحدة منفردة، حيث تستقبل **دخل استثاريًا** excitatory input من عدد محدود من العصبونات ذات القطبين (*باللون الأخضر*). وتولّد الخلايا العقدية **خرج** output من كينونات سينمائية ينقلها العصب البصري إلى مناطق الدماغ المختلفة لتفسيرها وتأويلها. هذا وتتفرع بعض التغصنات العقدية تفرعا واسع النطاق، بحيث تنقل معلومات متناثرة: في حين تتفرع تغصنات أخرى على نطاق أكثر ضيقا، بحيث تنقل معلومات عالية الميز. هذا ويستجيب البعض للتغير المتزايد في معدل ما تطلقه الخلايا ذات القطبين من **نواقل عصبية** neurotransmitter (الجزيئات المرسالية)، في حين يستجيب البعض الآخر للتغير المتناقص في هذا المعدل

(*) Overview /Surreal Vision
(**) Active Anatomy



إن **دخــول** inputs التي ترسلهــا الخــلايا ذات القطبين إلى خلايا **خروج** outputs العقدية ضمن كل نضيدة من النضائد لا تكفي لتوليد دستة العروض السينمائية في جميع الأحوال، ويشار هنا إلى أن الإشارات التي تبثها الخلايا ذات القطبين تحوِّرها تشكيلة منوّعة من العصبونات الصغيرة تسمى الخلايا **المقرنية** (**العديمة الاســتطالات**) amacrine (*باللون الرمــادي*). ويزاول بعض هذه الخــلايا عــمله بشكل عرضاني ضمن إحدى النضائد على نحو يمنع التواصل بين الخلايا العقدية البعيدة في هذه النضيدة. كما تثبط عصبونات مقرنية أخرى انتقال الإشارات عموديًا بين النضائد، ومن ثم بين الأفلام السينمائية المختلفة -كما لو كانت تبلِّغ إحدى النضائد ألاّ تسجل ما تسجله نضيدة أخرى. وبهذه الطريقة تلتقط الخلايا المقرنية الإشارات وتبثها من أجل تنسيق المسارات السينمائية. وقد تمكن باحثون أمثال <H. واسل> [من معهد ماكس بلانك لأبحــاث الــدمـــاغ بفرانكفورت]، و<Th. يولر> [من معهد ماكس بلانك للأبحاث الطبية في هايدلبرج]، و<R. ماسلاند> [من مستشفى ماساشوستس العام] من تحديد 27 نمطا مختلفا من الخلايا المقرنية (إلى جانب 10 أنماط من الخــلايا ذات القطبين و12 نمطا من الخلايا العقدية).

إن كل ما نراه في حيِّز ما نشاهده والزمن يمضي قدمًا، وحتى تسجيل نقطة سوداء ساكنة ثابتة في حيِّز ثلاثي الأبعاد لا لون له إنما يؤلف فيلما سينمائيا مادامت الشبكية تراه بشكل متواصل والزمن يتقدم. صحيح إن خلايا كثيرة من كل نمط من الخلايا العقدية تشغل الشبكية ويقوم طقم من هذه الأنماط بنقل فيلم سينمائي منفرد، ولكن أفلام الخلايا العقدية السينمائية هذه تمثل سيولاً مستمرة من الإشارات على عكس أفلام شباك التذاكر التي يُجرى إعدادها صورة فصورة.

إن **التــأثرات** interactions بين الخــلايا ذات القطبين والخلايا المقرنية التي تقوم بقراءتها في آن معًا كل مجموعة من الخلايا العقدية تؤلِّف البيانات التي نستقبلها لتأويل العالم الإبصاري. فحينما نقرأ ونمسك بالأشياء ونتعرف الوجوه ونسير هنا وهناك، تمثِّل التآلفات المختلفة لهذه الأفلام السينمائية الدالات الإبصارية الوحيدة التي يتلقاها الدماغ. إنها تشكل "لغة إبصارية" أصيلة ذات صياغة وقواعد نحوية خاصة بها تشمل مجموع المفردات العصبية لحاسة الإبصار.

---

(1) rods أو الأعمدة

(2) tip أو طرف

أفلام سينمائية في ومضة(*)

تستند توصيفاتنا للنشاط المعقد في الشبكية إلى تجاربنا الخاصة. فنحن نقوم بتسجيل ما يحدث في خلايا عقدية فرادى بواسطة إبرة زجاجية مجوفة بالغة الصغر ويتم بواسطة هذا الممص الميكروي (المجهري) حقن صبغ أصفر اللون ينتشر بسرعة عبر جميع تغصنات أي خلية عقدية منفردة مبينا لنا النضائد التي يصلها ذلك الصباغ. ويعمل هذا الممص أيضا كإلكترود يقيس النشاط الكهربائي للخلية، وهذا يعكس توليفة الإشارات الاستثارية الواردة من الخلايا ذات القطبين والإشارات التثبيطية الواردة من الخلايا المقرنية.

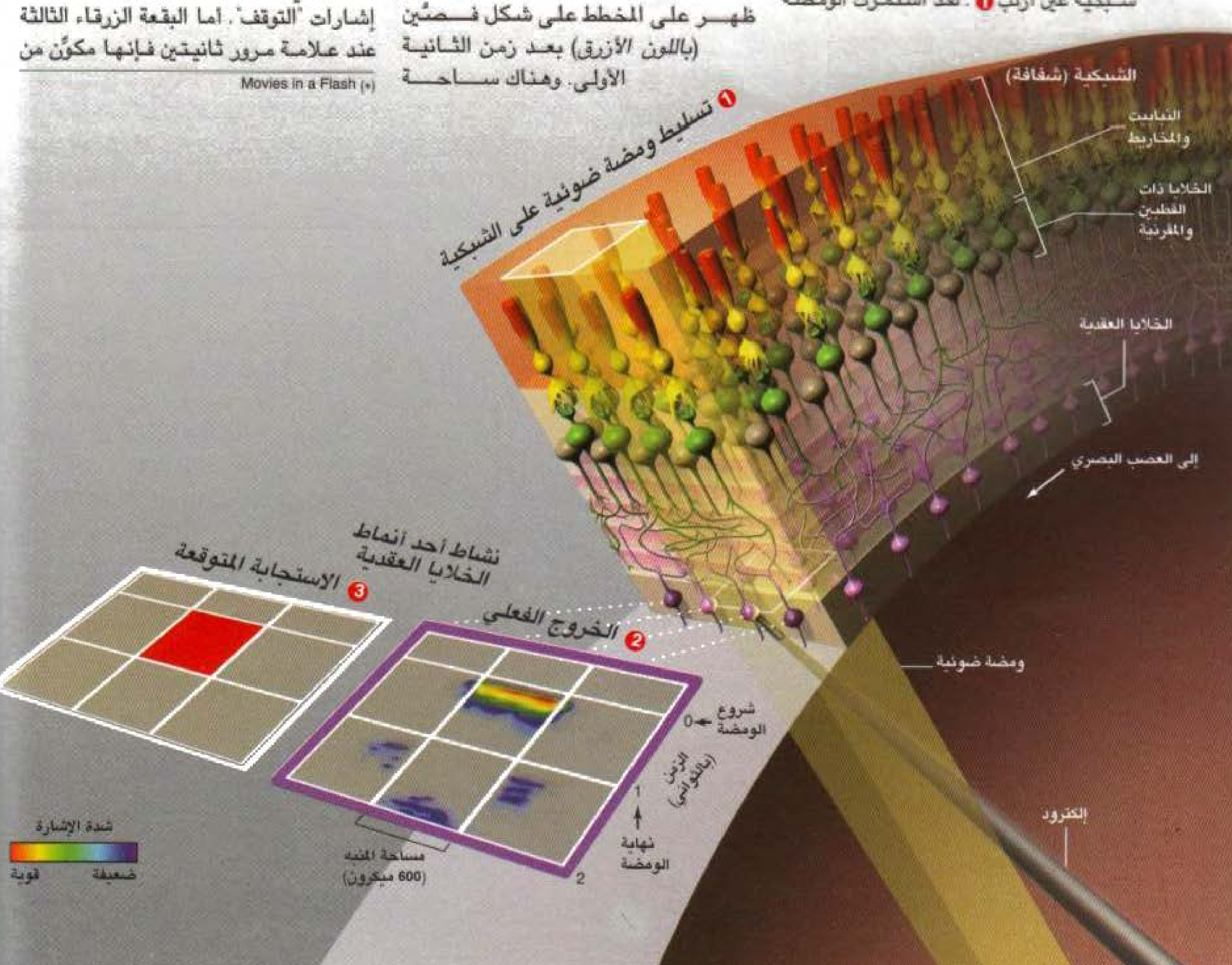
ولنكتسب شعورًا بالأفلام السينمائية التي تسيِّرها الخلايا العقدية إلى العصب البصري، شرعنا أولاً، بمنتهى البساطة في تسجيل كيف صورت مصفوفة خطية من الخلايا العقدية ومضة مربعة من ضوء جرى تسليطه على شبكية عين أرنب 1 . لقد استمرت الومضة ثانية واحدة واقتصرت على مربع قياسُ كل جانب من جوانبه 600 ميكرون. وهكذا وقع الوميض على منطقة صغيرة محددة من الشبكية لفترة زمنية معينة.

قمنا بتسجيل إشارات الاستثارة والتثبيط التي استقبلها نمط واحد من الخلايا العقدية خلال هذه الفترة وكرّرنا هذا الإجراء على كل نمط من أنماط دستة الخلايا العقدية. فكان لكل نمط استجابة مميزة، كما تنوّع مدى الاستجابات بشكل لافت للنظر. وفي *الشكل أدناه* 2 يمثّل كل مربع ثانية واحدة، ويشير اللون إلى شدة تيار الإشارة في واحد من أنماط الخلايا.

وكان من المثير للاهتمام بالنسبة إلى نمط الخلايا العقدية الموضح هنا أن الخلايا على امتداد عرض الومضة قد استجابت، ولكنها لم تكن ناشطة طوال الفترة الزمنية التي كان الضوء يسطع فيها. وكان من الغريب أن بعض الخلايا خارج امتداد الـ 600 ميكرون قد تنشّطت بعد انتهاء الومضة، وهو السلوك الذي ظهر على المخطط على شكل فصيّن (*باللون الأزرق*) بعد زمن الثانية الأولى. وهناك ساحة ثالثة داخل منطقة الومضة تنشطت كذلك نشاطا طفيفا بالقرب من العلامة التي تحدد مرور ثانيتين.

كيف لنا أن نفسر هذا النمط من الاستجابة؟ لو ظلت جميع الخلايا ترسل **خروج** outputs طوال مدة الثانية لكان نموذج الاستجابة «نيِّرًا» عبر **الفسحة** span جميعها طوال الثانية بأكملها، بحيث يملأ المربع المقابل على **لوحتنا** grid 3 ولكن في الحقيقة تحدث تصفية للخرج. فهو يبلغ في الاتساع عرض الومضة ولكنه يُقتضب بانقضاء الوقت بحيث لا يستمر إلاّ جزءًا من عشرة أعشار الثانية، ولا يبدأ إلاّ بعد نحو عُشر الثانية من بداية الومضة. لم يكن هناك فقط تأخير طفيف قبل استجابة الخلايا العقدية، بل إن هذه الخلايا استجابت لمدة تكفي فقط لملاحظة كيف تغير الضوء الداخل من مظلم إلى ساطع. وربما يمثّل هذا النمط من الخلايا العقدية بدء الإضاءة وليس بقاءها المتصل. وربما كان التنشيط الطفيف للخلايا الممثَّل في الفصين النائيين ينقل نوعا من إشارات "التوقف". أما البقعة الزرقاء الثالثة عند علامة مرور ثانيتين فإنها مكوَّن من

(*) Movies in a Flash





صحيح إن كل مجموعة من دستة الأطقم المختلفة للخلايا العقدية تبتدع قراءة مميَّزة تتركَّز على ناحية ما من العالَم الإبصاري. ولكن علينا أن نتذكر أن هذا الخرج ينجم عن الاستثارة التي تحدثها الخلايا ذات القطبين والتنشيط الذي تحدثه الخلايا المقرنية. وما النتيجة النهائية إلاَّ النموذج الصافي النهائي المشذَّب. هذا وتبيِّن المخططات ادناه 4 و 5 و 6 كلا الدخل والخرج النهائي لنمط من الخلايا العقدية يختلف عن النوع الموضح سابقا.

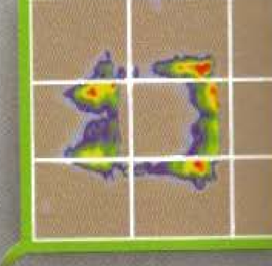
بهذه الطريقة يرسل كل نمط من الخلايا العقدية **تمثيلا زمكانيًا** spacetime نهائيًا على طول العصب البصري إلى الدماغ. ويكون كل تمثيل مُنْتَجا مميَّزا ينشأ عن زوج من نماذج الاستجابة الاستثارية والتثبيطية 7. وتُرسِل أنماط الخلايا العقدية الاثنا عشر مع مرور الزمن اثنيْ عشر من هذه السيول السينمائية إلى الدماغ. (ولم نسجل هنا إلاَّ سبعة من أجل جعل التجربة طيعة). هذا ويحدث تنوع لا يصدق من النشاط عند الاستجابة لمربع وامض بسيط ما.

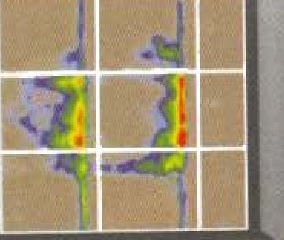
7 دخول إلى سبعة أنماط من الخلايا العقدية

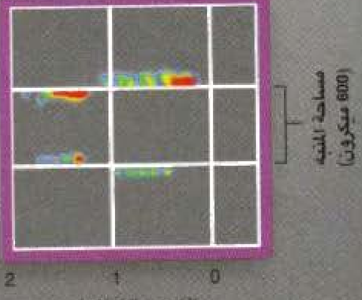
تثبيط

استثارة

نشاط نمط ثانٍ من الخلايا العقدية


4 استثارة بواسطة خلية ذات قطبين


5 تثبيط بواسطة خلية مقرنية



6 خروج نهائي إلى الدماغ

وجهٌ مُصفًى(*)

هدفنا، بالطبع، هو معرفة كيف تستخرج كل مجموعة من الخلايا العقدية معنىً من معاني العالم المرئي. ولما كانت الشبكية مصممة لمعالجة معلومات تفوق في الأهمية مجرد ومضة الضوء، فإننا تساءلنا ماذا يمكن أن يحدث حينما تشاهد الشبكية مشهدا طبيعيا مثل شخص يتحدث. فما الذي ستظهره عروض كل من الأفلام الاثني عشر؟ وهل يستخرج الفيلم الواحد صفة تغفلها الأفلام الأخرى؟

وعلى الرغم من الشروح التي تبدو مباشرة ودقيقة عن الكيفية التي فهمنا بها معالجة مربع من الضوء، فإنه يصعب، إلى حد لا يُصدَّق، سَبْر شبكية عين أرنب حي فعلياً باستخدام عدد كافٍ من **الإلكترودات**[1] أثناء ومضة بسيطة مدتها ثانية واحدة، باعتبار ذلك أقل بكثير من مشهد طبيعي يدوم دقيقة من الزمن. ومن أجل هذا التمرين الأخير قمنا ببرمجة المعلومات من تجربة الومضة داخل حاسوب يحاكي **شيبةً chip** شبكيةٍ صنعية شهيرة (هي الشبكية العصبية الخلوية) كان قد طورها <ا. شوا> [من جامعة كاليفورنيا ببيركلي] و<T. روسكا>[2] [من الأكاديمية المجرية للعلوم في بودابست]. فقد حوّلت هذه **المنظومة system** المربع الوامض إلى اثني عشر نموذجا زمكانيًا من الاستثارة والتثبيط تشبه إلى حد كبير النماذج التي تولّدها الشبكية الحيّة.

وبشيء من الجرأة عرضنا شيبة الشبكية المبرمجة في مشهد طبيعي، إذ جلس أحدنا (<ويربلين>) أمام الكاميرا وتحدث لمدة

(*) Face Filtered

(1) إلكترود أو مسرى أو قطب كهربائي.

(2) هو والد <B. روسكا> المشارك في تأليف هذه المقالة.

❶ عروض خلوية عقدية لوجه يتحدث

فيلم سينمائي من خلية من النمط 1

فيلم سينمائي من خلية من النمط 2

3

4

5

6

7



❷ عروض مؤتلفة مرسلة إلى الدماغ





لا تزيد كثيرا على دقيقة. وهنا ولد جهاز المحاكاة الذي قام ببرمجته لهذا التمرين «د. باليا» [من جامعة بودابست للتقانة والاقتصاد] بياناتا سينمائية لسبعة من عروض الخلايا العقدية المختلفة ❶

ولتأكيد أن محاكاة الشبيه كان دقيقا، قمنا بقياس استجابات بضعة عصبونات في شبكية الأرنب الحي إزاء وجه يتحدث. وهنا اتضح بسرعة أن كل مجموعة من الخلايا العقدية تعمل **كمصفاة** filter تستخلص بيانا زمكانيّا مميزا للعالم ويرسله في فيلم سينمائي مميّز إلى الدماغ. وقد قمنا بإضفاء لون على كلٍّ من العروض التي ولدها الحاسوب بغية تمييز أحدهما من الآخر.

فعلى سبيل المثال، يبدو أن إحدى **المصافي** filters لم تستخلص إلاّ **حافات** edges الملامح (*باللون البرتقالي في الصفحة المقابلة*) الموجودة على الوجه المتحدث بحيث يظهر العالم من الناحية الأساسية على شكل **رسم خطي** line-drawing، في حين قامت مصفاة أخرى (*باللون الأرجواني*) بإبراز الظلال أسفل العينين والأنف، وأنتجت مصفاة ثالثة (*باللون البيج*) أضواء ساطعة بدلاً من الظلال والحافات.

بالطبع يمكن أن تكون استنتاجاتنا فيما يخصُّ المعلومة التي التقطتها كل واحدة من المصافي الاثنتي عشرة غير صحيحة. ولسوء الحظ فإنه يستحيل تمثيل النماذج التي سجلناها على الصفحة المطبوعة بشكل دقيق، لأن تلك النماذج تتوالى متواصلة كأفلام سينمائية، ولكن يجب ملاحظة أنها تحتوي على عدة فرجات فارغة. ومع ذلك، فإن طريقتنا تبيِّن أن كل واحدة من المصافي تكون حساسة تجاه سمة معينة من سمات المظهر الجسدي للوجه وحركته، وأن كل نمط من أنماط الخلايا العقدية له طريقته المميّزة في رسم صورة العالم.

وكذلك أتاح لنا تلوين **العروض** representation اقتفاء إسهامات كل مجموعة من الخلايا العقدية في البيان المؤتلف النهائي المتولِّد بعد تراكب الأفلام السينمائية. لقد جمعنا الأفلام السينمائية السبعة المنسابة في فيلم سينمائي رئيسي. فأعطت أربع **أطر** frames مأخوذة من لحظات مختلفة لحديث «ويربلين» الذي دام دقيقة واحدة، ❷ إحساسا بكيفية تحرك وجهه في أثناء انفتاح شفتيه وانغلاقهما، وذلك بالاستناد إلى بروز بعض العروض وخفوتها على نحو تجعله يبدو كالشبح. وهذا هو ما يستقبله الدماغ.

إن أفلامنا السينمائية ما هي إلاّ تقريبيّة، ومع ذلك فهي توضح بشكل لافت أن هذا النسيج العصبي الرقيق (أي الشبكية) في مؤخر العين يقوم بفرز العالم المرئي إلى دستة مكوّنات متميّزة، وتسافر تلك المكونات سليمة ومنفصلة إلى مناطق إبصارية متميزة في الدماغ، بعضها واعٍ وبعضها الآخر غير واعٍ. إن التحدي الذي يواجهه علم الأعصاب حاليًا هو فهم كيف يفسر الدماغ ويؤوِّل رزم المعلومات هذه ليولد منظرا متكاملا رائعا للواقع. ■

المؤلفان

Erank Werblin - Botond Roska

قاما بكشف النقاب عن كثير مما يخصُّ الدارية circuitry الوظيفية للشبكية في أوائل التسعينات في جامعة كاليفورنيا ببيركلي. ويواصل «ويربلين» عمله هناك أستاذًا في علم الأعصاب، وكان قد نشر في عام 1973 مقالة في سيانتفيك أمريكان بعد اكتشافه هو وزميله «د. دولنج» [من جامعة جون هوبكنز] خصائص فيزيولوجية متميّزة تنفرد بها عصبونات الشبكية. أما «روسكا» فهو رئيس مجموعة في معهد فريدريش ميشر للأبحاث الطبية البيولوجية في بازل بسويسرا، حيث يعمل على تطوير تقنيات جينية لتحديد المسارات الإبصارية.

مراجع للاستزادة

Directional Selectivity is Formed at Multiple Levels by Laterally Offset Inhibition in the Rabbit Retina. Shelley. Fried, Thomas A. Münch and Frank S. Werblin in *Neuron*, Vol. 46, No.1, pages 117-127; 2005.

Parallel Processing in Retinal Ganglion cells: How Integration of Space-time Patterns of Excitation and Inhibition Form the Spiking Output. Botond Roska, Alyosha Molnar and Frank S. Werblin in *Journal of Neurophysiology*, Vol. 95, pages 3810-3822; 2006.

sa يمكن رؤية الشريط السينمائي الذي صنعته الشبكية لوجه المتحدِّث على الموقع:
www.sciam.com/ontheweb

Scientific American, April 2007

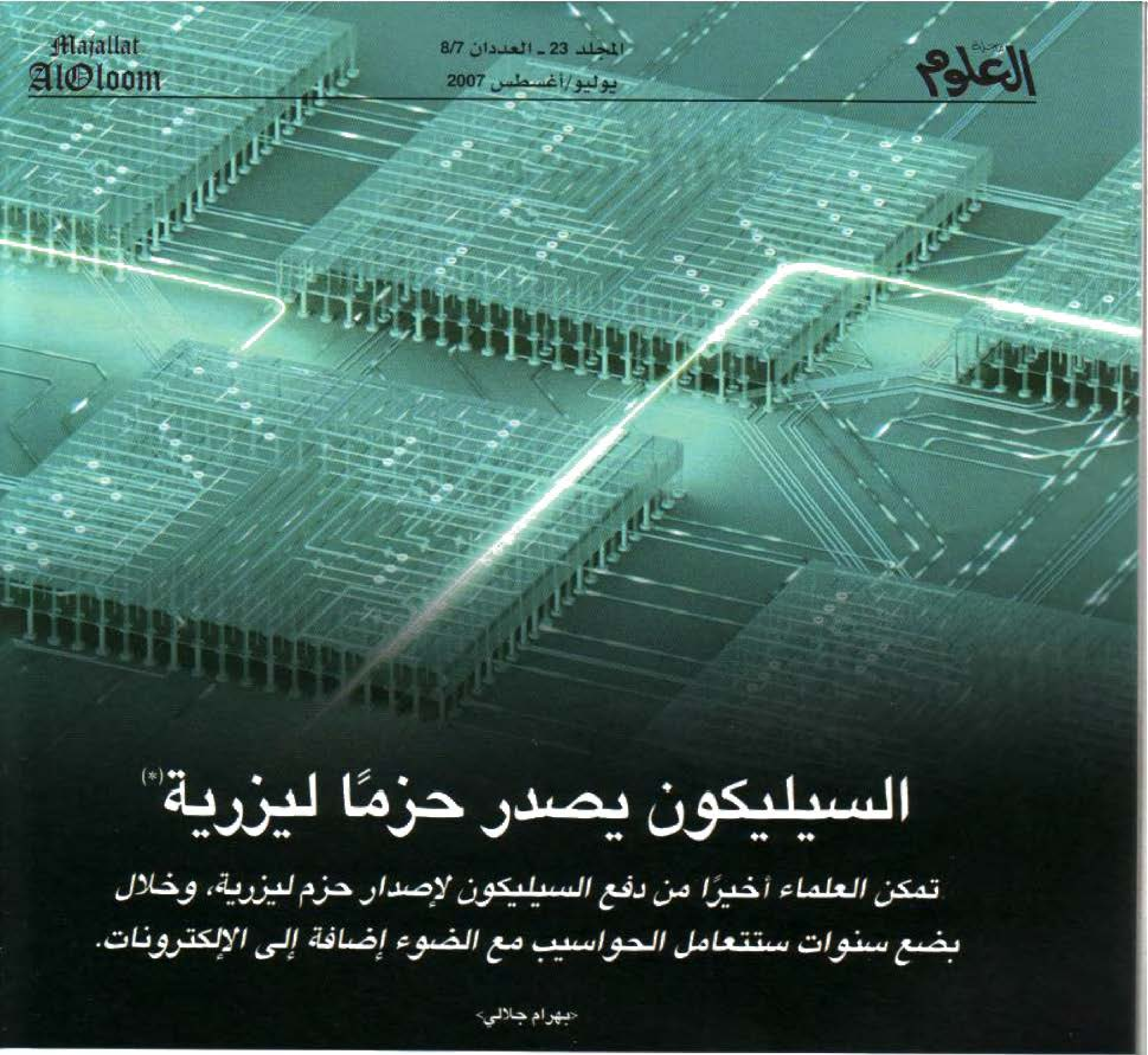




ثلاث ثوان



أربع ثوان



السيليكون يصدر حزمًا ليزرية(*)

تمكن العلماء أخيرًا من دفع السيليكون لإصدار حزم ليزرية، وخلال بضع سنوات ستتعامل الحواسيب مع الضوء إضافة إلى الإلكترونات.

<بهرام جلالي>

تُمكن شيپات السيليكون القليلة التكلفة المهندسين من استثمار سيالات الإلكترونات لإنجاز وظائف وسيرورات لا تحصى تجعل حواسيبنا وأجهزة الهاتف الخلوي والأجهزة الإلكترونية الأخرى مفيدة للغاية. فإذا تمكنت دارات السيليكون التكاملية بشكل مشابه من توليد حزم الضوء والتحكم فيها، فإنها ستخلق مجالاً من التقانات الجديدة الرخيصة والمناسبة للعديد من التطبيقات الأخرى. ولكن الطبيعة الخاصة للسيليكون أحبطت، لعدة عقود من الزمن، الجهود العنيدة للعلماء لتحويل هذه المادة إلى منبع للضوء، المركز الضروري

وهناك حاليا مجموعات أبحاث عديدة، بما فيها مجموعتنا، تسعى إلى إنتاج ضوء الليزر من السيليكون. ويمكن أن يكون للتقدم في هذا المجال منعكسات هائلة على الأجهزة الإلكترونية التي

إن حزمة الليزر التي تظهر في الصورة (اللون الأحمر والأبيض في العنوان) كانت الأولى التي يصدرها جهاز من السيليكون، وضوؤها تحت الأحمر غير مرئي للعين و لكنه يظهر في الصورة بلون غير حقيقي. يمكن لليزرات السيليكون المتكاملة مع الشيپات الميكروية (الخلفية) أن تجعل الحوسبة بواسطة الضوء القليلة التكلفة أمراً عملياً. أمراً عملياً.

تتضمن ليزرات ومضخمات ضوئية تعتمد حاليا على مواد تصدر إشعاعا ليزريا أكثر تكلفة بكثير وأقل شيوعا من السيليكون.

إن استبدال أسلاك التوصيل النحاسية التقليدية بقنوات ضوئية يمكن أن يرفع حدود سرعة نقل البيانات عدة مراتب لا تستطيع التقانة الحالية الوصول إليها. فمثلاً إن سرعة "المودم" السلكي، وهو الجهاز العامل في اتصالات الإنترنت المنزلية، محدودة حاليا

(*) MAKING SILICON LASE

بمعدل نقل بيانات يصل إلى نحو ميگابايت واحد في الثانية، في حين أنه يمكن بسهولة للوسائط الضوئية التي تعتمد على شيپات السيليكون نقل الملفات الرقمية الضخمة مثل ملفات الڤيديو العالي الدقة بمعدلات تصل إلى 10 جيگابايت في الثانية، وهذا يمثل تحسنا بمقدار 10 000 مرة. ويمكن أيضاً **للمحسات** sensors المدمجة التي تحتوي على دارات تكاملية وليزرات سيليكونية أن تضم القدرات **التشخيصية «لمختبر على شيپة»** Lab-on-chip، وبعض الاتصالات اللاسلكية للكشف عن الملوثات أو عوامل الحرب الكيميائية أو المتفجرات، وذلك كجزء من شبكة رصد بيئي وأمني واسعة. وفي تطبيقات عسكرية واعدة، فإن ليزرات السيليكون يمكن أن تكون قادرة على تضليل محسات الأشعة تحت الحمراء في الصواريخ المضادة للطائرات التي تعمل على متابعة الأثر الحراري، ومن ثم تقديم إجراء مضاد وغير مكلف لهذه الصواريخ.

لماذا لزم كل هذا الوقت الطويل لتعليم السيليكون هذه الحيلة الجديدة؟ فبخلاف المواد التي تستخدم عادة وسطا مضيفا لتوليد إشعاع الليزر (مثل زرنيخيد الگاليوم (GaAs) المستخدم في السواقات الليزرية DVD)، فإن السيليكون ليس مرتبا بصورة طبيعية ليدعم السيرورة الثنائية المرحلة اللازمة لإنتاج حزمة ضوء مترابط. ولا يمكن للسيليكون أن يصدر ضوءاً بكفاءة عندما يُنشّط (وهذا هو المتطلب الأول). ومهما كان الضوء الذي ينتجه السيليكون فهو غير قادر على تضخيم هذا الضوء إلى حزمة ليزر بواسطة "حثه" على توليد فوتونات أكثر. ("الليزر" هو مصطلح يصف تضخيم الضوء بواسطة الإصدار المحثوث للإشعاع.)

في الليزر، يقوم منبع طاقة خارجي، يكون عادةً ضوءاً أو تياراً كهربائياً، «بضخ» إلكترونات ذرات الوسط المضيف إلى مستوى طاقة أعلى، وهو الذي يدعوه الفيزيائيون مستوى أعلى (أو مثاراً). وعندما تعود هذه الذرات إلى مستوى طاقتها الطبيعي (الأدنى)، فإن الطاقة الزائدة تتحرر على شكل فوتونات ضوء (وهي الوحدات الكمومية الأساسية للإشعاع الكهرمغنطيسي الذي يوجد في الوقت نفسه بطبيعة مزدوجة: موجية وجسيمية). وقد دعا أينشتاين هذه السيرورة **«بالإصدار التلقائي»** spontaneous emission، وهي الظاهرة التي تولد فوتونات تنتشر بشكل عشوائي في جميع الاتجاهات، محدثة ضوءاً منتثراً ذا شدة منخفضة. وهذا الضوء يشبه كثيراً الضوء الوارد من المصباح المتفلور. أما عندما يمر واحد من هذه الفوتونات الصادرة خلال مجموعة إلكترونات في المادة المضيفة تم ضخها سابقا، فإنه يقدح أو يحث جميع الالكترونات في آن واحد لتفريغ طاقتها الإضافية. وهذا مفهوم اقترح أول مرة في بحث نشره أينشتاين عام 1917. تسير الفوتونات الناتجة معاً بالاتجاه نفسه بصورة متزامنة، مُشكلةً حزمة ضوء عالية التوجيه. وعندما تسير الحزمة خلال ذرات مثارة أخرى في الوسط، فإن فوتوناتها تحث بدورها إصدار فوتونات أكثر بشكل متسلسل. وهذا التأثير مشابه للطريقة التي تنمو فيها كتلة من الجليد عندما تنحدر على سفح جبل مغطى بالثلج.

لم يحظ تنبؤ أينشتاين حول الإصدار المحثوث باهتمام كبير حتى الخمسينات، عندما بدأ الفيزيائيون يدركون تطبيقاته الممكنة في الأجهزة الضوئية. وفي عام 1958 اقترح <Ch. تاونز> و <A. شافلوف> إحاطة المادة المضخمة للضوء جزئياً بمرايا تعكس للداخل بعض الفوتونات التي ولدتها المادة، وبيّنا أن سيرورة الحثّ من ثم ستغذي نفسها (كما في تفاعل تسلسلي). وهذه الطريقة تصبح، بمجرد أن تكتمل، قادرة على توليد دفق ضوئي قوي ذي طول موجة محدد تماماً - أي حزمة ليزرية. وبعد سنتين فقط، بَنَى <T. ميمان> تجريبياً أول ليزر عملي مصنوع بضخ بلورة ياقوت ضوئياً بمصباح قوي.

لقد أثبت السيليكون أنه أقل طواعية بشكل كبير من بلورات الياقوت أو من الأوساط الليزرية التي طُورت فيما بعد. ففي أشباه الموصلات - وهي مواد يقع أداؤها الكهربائي في منتصف الطريق بين الموصلات الممتازة كالنحاس والعوازل كالمطاط أو بعض أنواع السيراميك - توجد الإلكترونات في **عصابات طاقة**[1]، وهي مجالات مستويات طاقة، أو حالات طاقة يمكن للإلكترونات أن تشغلها.

ووفقاً للنظرية الكمومية فإن عصابة الطاقة تصف مجال المستويات التي يكون مسموحاً للإلكترونات باحتلالها، أما المجال المحظور بين العصابات المسموحة فهو مجال من مستويات الطاقة لا يمكن للإلكترون أن يشغلها. يمكن للإلكترون في مدار الذرة الخارجي أن يربح طاقة بامتصاص فوتون (تجعله يقفز إلى عصابة أعلى) أو أن يحرر طاقة بإصدار فوتون (فيهبط من جديد للأسفل). ويصنف الفيزيائيون هذه التأثرات نوعاً من حوادث الانتثار.

لنتخيل عصابات الطاقة كسلسلة من الدلاء، التي يقع ضمنها الإلكترون (*انظر المؤطر في الصفحة 69*). تبقى عادةً جميع الإلكترونات تقريباً في عصابة الطاقة، أو الدلو الأدنى، تاركةً العصابة الأعلى فارغةً تقريباً. ولكن إذا اصطدم فوتون ذو طاقة مساوية عرض المجال المحظور أو أكبر منه بإلكترون أمكنه أن يرفع الإلكترون إلى العصابة الأعلى، أي إن الإلكترون يقفز من الدلو الأدنى إلى الدلو الأعلى. ويسمى هذا المفعول امتصاص الضوء، وهو الأساس للطريقة

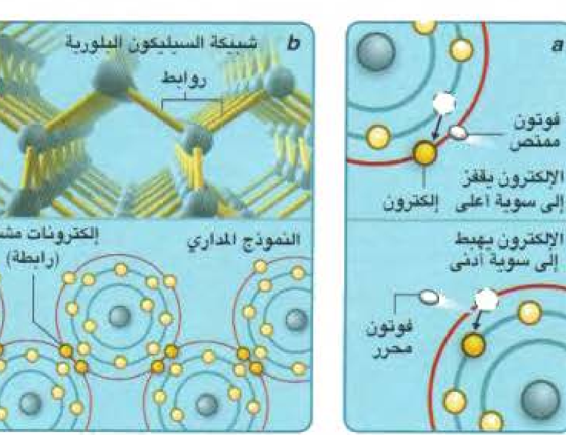
نظرة إجمالية/ ليزر السيليكون[*]

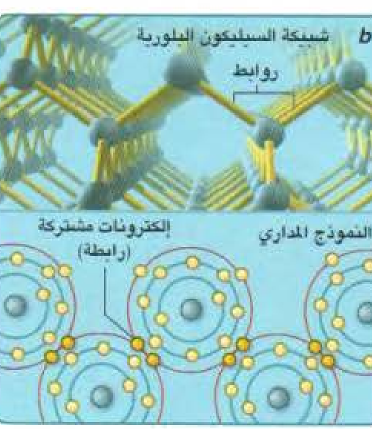
- **لفترة طويلة سعى العلماء إلى الحصول على شيپة سيليكون تستطيع التعامل مع الضوء بمهارة كتعاملها مع الإلكترونات. ولكن السيليكون لا يصدر الضوء بسهولة وبخاصة ضوء الليزر المكثف. إن تقدماً كهذا قد يؤدي إلى نقل البيانات الرقمية بسرعة فائقة كما سيؤدي إلى شبكات محسات جديدة وأيضاً إلى العديد من الابتكارات.**
- **بعد سنوات عديدة من العمل، تمكن الباحثون من جعل السيليكون يصدر إشعاعاً ليزرياً باستخدام عدة تقنيات مختلفة مستندة إلى المواد. وأصبحت ولادة تقانة هجينة جديدة - الإلكترونيات الضوئية السيليكونية - في متناول اليد.**

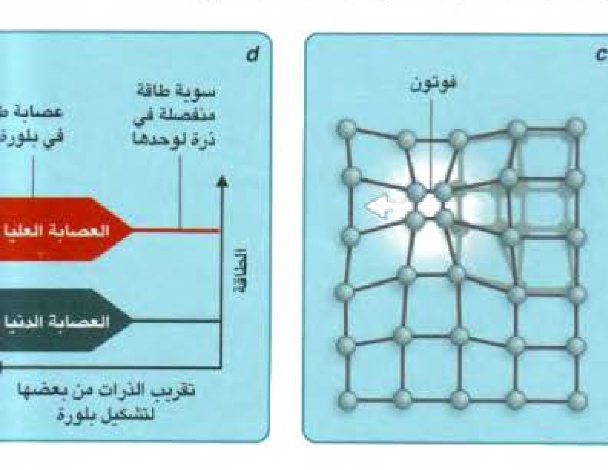
(*) Overview/Silicon Lasers
(1) energy bands

التحدي لجعل السيليكون يصدر إشعاعاً ليزرياً[*]

يوفر السيليكون أملاً كبيراً من أجل حوسبة بواسطة الضوء القليلة التكلفة، لكن طبيعته ذاتها تجعله وسطاً غير قابل للإصدار الليزري.







تعتمد عملية الليزرة (إصدار الإشعاع الليزري) على السلوك الكمومي للإلكترونات في المدارات الخارجية للذرات في مادة مناسبة. يحفّز (أو يُضخ) إلكترون في الطبقة الخارجية لذرة منفردة حين يمتص فوتوناً. الوحدة الكمومية الأولية للضوء. برفعه إلى مدار وسوية طاقة أعلى [a] يحرر الإلكترون المحفز فوتوناً حين يهبط إلى سوية أدنى.
تشكل الذرات في جسم صلب روابط بواسطة التشارك في هذه الإلكترونات الخارجية [b]. وللوصول إلى تضخيم الضوء، وهو الشرط الأساسي لليزرة، تضخ منابع طاقة خارجية الإلكترونات التشاركية إلى سويات طاقة أعلى. وحين تحرر الإلكترونات المحفزة فوتونات فإن هذه تحثّ بدورها إصدار فوتونات أخرى وهذا يضخم الضوء. ويمكن للفوتونات كذلك أن تضخَّم حين تصطدم بالفونونات المثارة والتي هي الاهتزازات الذرية المكماة للشبكة البلورية [c].
حين ترتبط الذرات المنفردة بعضها ببعض لتشكل بلورة تتغير سمة سويات طاقة الإلكترونات فتصبح عصابات أعرض [d] بسبب تأثير الذرات القريبة العديدة على الوسط الكهرمغنطيسي. وعلى هذا فإن إلكتروناً مضخوخاً يقفز من عصابة إلى أخرى.
وحين يُرسم الخط البياني لطاقات الإلكترونات في وسط ليزري شائع مثل زرنيخيد الكاليوم بدلالة الاندفاعات فإن عصابات الطاقة تصطف إحداها فوق الأخرى لأنها تشترك بالاندفاعات ذاتها [e] (تصف العصابة الحالات الكمومية الممكنة للإلكترونات، ولكل من هذه الحالات كمية يمكن مطابقتها مع الاندفاع الكلاسيكي الذي ينبغي أن يبقى محفوظاً أثناء التصادمات.) إن للعصابات في السليكون، على العكس من ذلك، اندفاعات مختلفة. وهذا يعني

التي تقوم فيها الخلايا الشمسية بتحويل الضوء إلى كهرباء.

ولكي تنتج المادة فوتونات فإنها يجب أن تتلقى طاقة كافية لتضخ الكثير من الإلكترونات من العصابة الدنيا إلى العصابة العليا، مسببةً ما يسمى **انعكاس الإسكان** population inversion (مقارنة بالتوزيع المعتاد في العصابات) وليس من الضروري ضخ كامل الإلكترونات، ولكن يكفي فقط التأثير في الجزء القريب من قمة العصابة الدنيا وغالباً ما يثير المهندسون الإلكترونات مباشرة بإقحام تيار كهربائي عبر **ديود شبه موصل**[1] وكذلك فإن إضاءة المادة بمنبع ضوء خارجي، كما فعل <جيمان>، يمكن أن تضخ الإلكترونات.

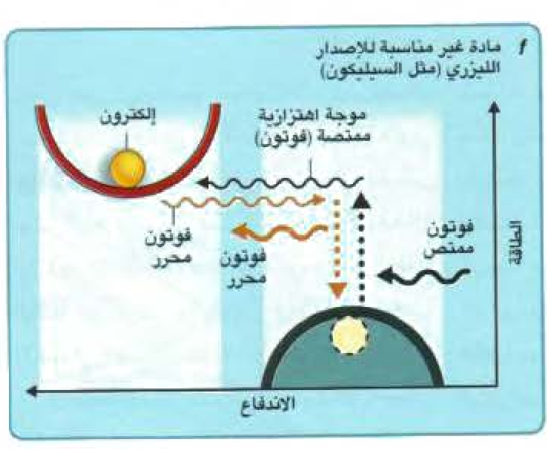
تُحرر الإلكترونات الموجودة في العصابة العليا في آخر الأمر طاقة، فتصدر فوتونات عندما تنتشر الفوتونات الناتجة خلال شبه موصل يحتوي على العديد من الإلكترونات في المستوى الأعلى (**إسكان إلكتروني**[2] معكوس)، فإنها تحثّ إلكترونات أخرى على إصدار مزيد من الفوتونات وتكون إصدارات شبه الموصل في أحسن الأحوال مساوية للطاقة الممتصة.

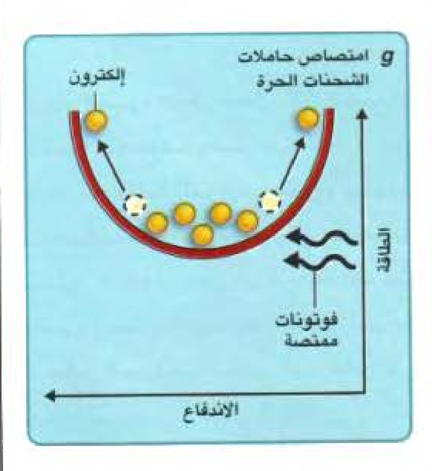
ومع أن الإلكترونات والفوتونات تتبادل الطاقة في سيرورات الامتصاص والإصدار هذه (سيرورات الانتثار)، فإن الطاقة الكلية للجملة تبقى محفوظة: أي إن الطاقة المكتسبة تساوي الطاقة المفقودة، كما هو مطلوب في قانون انحفاظ الطاقة. ولكن الامتصاص والإصدار يحصلان فقط إذا كان الاندفاع محفوظاً أيضاً وفقاً لقانون **انحفاظ الاندفاع**. يمكن النظر إلى الاندفاع، الذي يتحدد بالنسبة إلى فوتون يسير (مثل موجة) في بلورة من طول موجته مباشرة، على أنه ميل الفوتون لمتابعة سيره في الاتجاه نفسه. ولكن الفوتونات لكونها رزماً صغيرة من الطاقة الصافية، لا تملك اندفاعاً كافياً لتسهم في تصادمات الانتثار. ولهذا تحدث الانتقالات بصورة أفضل عندما يكون للعصابتين الدنيا والعليا (نقاط البداية والنهاية للانتقالات بين العصابات) الاندفاع نفسه. ويتحقق هذا التساوي في الاندفاع في المواد ذات الاستخدام الشائع كمواد مصدرة للإشعاع الليزري، مثل: زرنيخيد الكاليوم وفسفيد الأنديوم، التي تقع عصاباتها الطاقية بعضها فوق بعض بشكل مباشر، عندما ترسم بيانياً على مخطط يربط الطاقة مع الاندفاع. ويسمح هذا الاصطفاف المباشر بتبادل مباشر للطاقة بين الإلكترون والفوتون (انظر *المؤطر في الصفحتين 68 و 69*). فإذا كانت لمادة ما هذه الخاصة المسماة **الاصطفاف المباشر** direct lineup[3] كانت الخاصة عائدة لترتيب ذرات هذه المادة في **شبيكتها البلورية**[4].

على كل حال، إن للسيليكون اصطفافاً

(*) The Challenge of Getting Silicon to Lase
(1) semiconductor diode
(2) electron population
(3) direct lineup
(4) crystal lattice







ن الطاقة من فوتون ممتص لا تكفي لوحدها لكي يقفز الإلكترون إلى عصابة أعلى [f]. وعوضاً عن ذلك ينبغي على الإلكترون أن ينتظر حتى يظهر فونون له الاندفاع الإضافي المناسب لكي تنتقل الطاقة. ولسوء الحظ فإن هذه الإلكترونات غالباً ما تفقد طاقتها الزائدة على شكل حرارة قبل أن يصل فونون مناسب، وهذا يؤدي إلى عدم إصدار السيليكون الضوء بكفاءة.

تتيح كفاءة الإصدار المنخفضة للسيليكون لظاهرة تدعى الامتصاص بواسطة حاملات الشحنة الحرة أن تعيق تضخيم الضوء والليزرة. فحين يتأثر فوتون مار مع إلكترون محفَّز (حامل شحنة حر) في عصابة عليا يمكن أن تحدث واحدة من عمليتين متنافستين: فإما أن يحث الفوتون إصدار فوتون آخر مسبباً هبوط الإلكترون إلى عصابة أدنى أو أن يمتص الإلكترون ببساطة الفوتون ما يؤدي إلى مجرد رفع الإلكترون إلى أعلى في العصابة ذاتها [g]، وهذا حدث لا ينتج فوتوناً آخر ولذلك فهو لا يساعد على تضخيم الضوء والليزرة.

تحتوي عصابات زرنيخيد الكاليوم العليا على القليل من الإلكترونات نسبياً. وحين يُرسم مخططها البياني تبدو العصابة العليا ضيقة ذات جوانب شديدة الانحدار. وبما أن لزرنيخيد الكاليوم معدل إصدار عال (يضخم الضوء بفعالية لأن عصاباته مصطفة إحداها فوق الأخرى) فإن إصداراته الفوتونية تفوق بسهولة امتصاصاته، ولذلك فإن هذه المادة تضخم الضوء. أما عصابات السيليكون العليا الأكثر عرضاً والتي جوانبها أقل انحداراً فتتطلب إلكترونات أكثر لتمتلئ. فالسيليكون، بمعدل إصداره المنخفض (الذي سببه الاصطفاف غير المباشر) وبمعدل امتصاص حاملات شحناته الحرة العالي لا يستطيع تضخيم الضوء.

غير مباشر بصورة طبيعية نتيجة بنية بلورية رية غير ملائمة إطلاقاً، وهذا يعني أن المادة تعاني اختلافاً كبيراً في الاندفاع بين عصابتيها العليا والدنيا (تصف العصابة الحالات الكمومية الممكنة التي يمكن أن يأخذها الإلكترون. ولكل حالة مقدار يمكن أن يقابل اندفاعاً **معهوداً**(١)، وهذا يجب أن يبقى محفوظاً أثناء التصادمات). لهذا لا تستطيع الإلكترونات أن تتبادل الطاقة بسهولة مع الفوتونات وتحافظ في الوقت نفسه على الاندفاع. وعوضاً عن هذا يجب على الإلكترونات أن تنتظر حتى تظهر موجة اهتزازية لشبكة السيليكون البلورية (والتي تسمى فونون) لها الاندفاع المناسب بالضبط، لتقدم الاندفاع الإضافي الضروري لتسهيل سيرورة نقل الطاقة. ولسوء الحظ فإن الإلكترونات في السيليكون غالباً ما تفقد طاقتها الإضافية على شكل حرارة فيما هي تنتظر وصول فونون مناسب. ونتيجة لذلك يبدي السيليكون كفاءة إصدار منخفضة. فمن بين مليون إلكترون مثار هناك إلكترون واحد سوف يحرر فوتوناً بنجاح. ومقارنة بالأوساط الليزرية الشائعة مثل (زرنيخيد الكاليوم) فإن كفاءة إصدار هذا الأخير أكبر بنحو 10 000 مرة.

تحد الفجوة الطاقية غير المباشرة من كفاءة ليزر السيليكون، ولكنها لا تمنع سيرورة الليزرة بحد ذاتها. هناك أيضاً عاملان آخران خاصان بالسيليكون لهما تأثير. فامتصاص حوامل الشحنات الحرة، وهي السيرورة التي تحصل ضمن عصابة طاقة معينة. لنتصور مجموعة من الإلكترونات (حوامل شحنات حرة) قد ضُخَّت إلى عصابة أعلى. فعندما يتأثر فوتون مار مع إلكترون مثار، يمكن أن تحصل واحدة من حادثتين: إحداهما ملائمة والأخرى غير ملائمة. يمكن للفوتون أن يسبب هبوط الإلكترون إلى عصابة أدنى ويحثه على إصدار فوتون آخر. وهذا بدوره يغذي سيرورة تضخيم الضوء. أو يمكن للإلكترون أن يمتص الفوتون، ثم يتحرك فقط إلى الأعلى في العصابة العليا. وهذه السيرورة لا تؤدي إلى توليد فوتون آخر. ولذلك لا ينتج منها تضخيم للضوء. ومعدلات حدوث هذين الأثرين المتنافسين تعتمد على عدد الإلكترونات الموجودة في عصابة الطاقة العليا.

تكون العصابات (أو الدلاء)(٢) العليا في المواد الليزرية الجيدة (مثل زرنيخيد الكاليوم) ضيقة وذات جوانب شديدة الانحدار، ولذلك فهي تميل إلى إمساك إلكترونات قليلة نسبياً. وعلى العكس من ذلك فإن السيليكون يتميز بعصابات طاقة عليا أعرض وأقل انحداراً، وهي لذلك تتطلب عدداً أكبر من الإلكترونات لتمتلئ. وعندما يُضخ السيليكون، يكون لديه ميل كبير إلى دعم امتصاص حوامل الشحنة الحرة. ولما كان لزرنيخيد الكاليوم معدل إصدار عال (فهو

(١) classical momentum
(٢) buckets

تحث الذرات المثارة أثناء سيرها إصدار فوتونات أكثر بشكل متسلسل

يضخم الضوء بشكل فعال. لأن عصاباته الطاقية مصطفة بشكل مباشر)، فإن إصداراته الكلية للفوتونات تفوق بسهولة امتصاصاته. أما السيليكون ـ بمعدل إصداره المنخفض (بسبب الاصطفاف غير المباشر) ومعدل الامتصاص العالي لحوامل الشحنات الحرة فيه ـ فهو غير قادر على تضخيم الضوء.

وهناك سيرورة خفية تعرف **باتحاد أوجيه** Auger recombination تعيق أيضاً ليزرة السيليكون في هذه الظاهرة. فإن الإلكترون في عصابة الطاقة العليا بدلاً من إصدار الضوء يتخلى عن طاقته للإلكترونات الأخرى. وهذه بدورها تتخلى عن طاقتها الزائدة على شكل حرارة. وتعتمد كمية الطاقة الضوئية الضائعة على عدد الإلكترونات الموجودة في العصابة العليا. ويخضع السيليكون لاتحاد أوجيه أكثر مما هي عليه الحال في زرنيخيد الغاليوم، لأنه يحتاج إلى ضخ إلكترونات أكثر إلى العصابة العليا للتغلب على كفاءة إصداره الضوئي الضعيفة.

تعليم السيليكون إصدار إشعاع ليزري(*)

في السنوات الخمس الأخيرة بدأ الباحثون بإيجاد طرق للتغلب على تلك الصعوبات المتأصلة في السيليكون. وإحدى هذه الطرق تستفيد لتحسين إصدار الضوء من ظاهرة رائعة تسمى **الحصر الكمومي** quantum confinement، تحدث عندما تقيد حركة الإلكترون باتجاه واحد أو أكثر. فبتقييد الحركة في حيز ثلاثي الأبعاد، يدعى القفص الكمومي، يتهيج الإلكترون عندما يتقلص حجم القفص. وتحدث هذه الظاهرة نتيجة لمبدأ عدم التعيين لهايزنبرگ، الذي ينص على أن تحديد مكان إلكترون يجعل تحديد سرعته ومن ثم اندفاعه (الذي يساوي حاصل جداء الكتلة في السرعة) أكثر عشوائية. ويخفف هذا الشرط بشكل فعال من قيد انحفاظ الاندفاع، الذي يحكم انتقال الطاقة بين فوتون وإلكترون. وهذا يرفع معدل الإصدار الضوئي لشبه الموصل.

ولصنع قفص كمومي للسيليكون، يمكن للباحثين أن يصنعوا فيلماً رقيقاً من زجاج السيليكا (ثنائي أكسيد السيليكون) وأن يزرعوا فيه قطعاً صغيرة جداً من السيليكون البلوري. وهذه البلورات النانوية، التي يمكن أن تُضخ بواسطة إضاءتها بمنبع ضوء خارجي، لا يتجاوز عرضها بضع ذرات، ولذلك يمكنها تحقيق الحصر الكمومي. وفي عام 2000 كانت مجموعة «L. بافيسي» [في جامعة ترينتو بإيطاليا] أول من سجل دليلاً تجريبياً على بلورات سيليكون أبعادها من مرتبة النانو مضخمة ضوئياً. في البداية استقبل الفيزيائيون هذه النتيجة بالشك، ولكن «Ph. فوشيت» [من جامعة روتشيستر] وآخرين أكدوا فيما بعد هذه النتيجة. ومع أن هذه الطريقة لم تُنتج الليزر بعد، فإنها أوحت باختراعات أخرى حققت نتائج مشجعة.

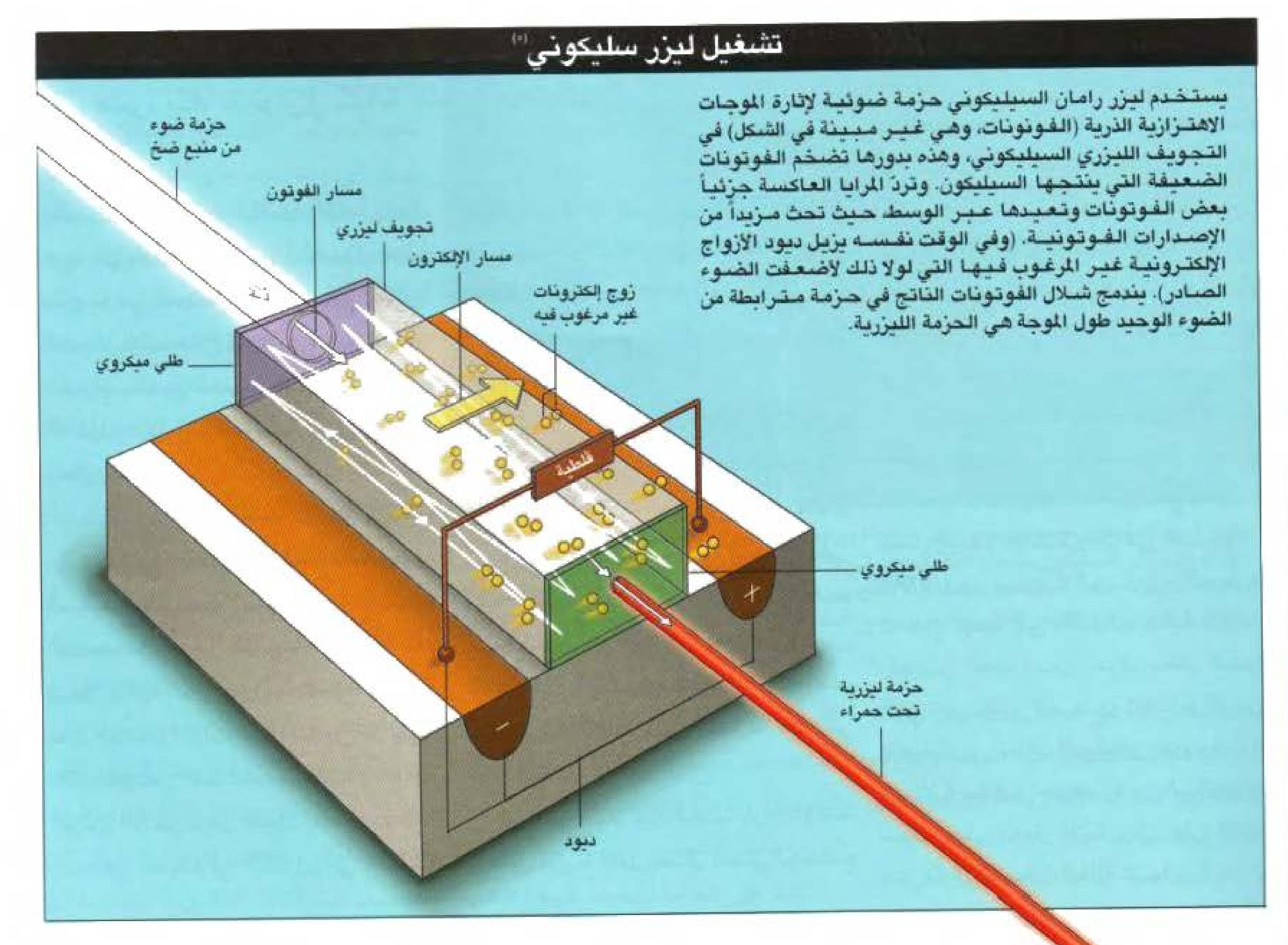
ويستفيد أحد الإنجازات التي تستثمر الحصر الكمومي من العناصر النادرة (مثل الإربيوم erbium)، التي يعرف العلماء أنها مُصدرات جيدة للضوء. فمصنّعو الأجهزة يضيفون بشكل روتيني عنصر الإربيوم إلى الزجاج في الليف الضوئي لإنتاج مضخمات تعمل بالضخ الضوئي وليزرات لشبكات الاتصالات. قاد «F. بريولو» [من جامعة كاتانيا في إيطاليا] و «S. كوفا» [من مركز STM للإلكترونيات الميكروية في جنيف] البحث بهذه الطريقة بهدف تحسين الأداء الضوئي للسيليكون. وقد برهنت مجموعة «كوفا» عملياً على إمكانية تصنيع ديودات مصدرة للضوء (LED) تعمل عند درجة حرارة الغرفة بكفاءات عالية كتلك التي تحققها الأجهزة المصنوعة من زرنيخيد الگاليوم.

إن الديودات الضوئية المطورة في مركز الإلكترونيات الدقيقة هي عبارة عن طبقات من معدن ـ زجاج ـ شبه موصل، حيث يقوم الجهد المطبق بين المعدن وشبه الموصل بتسريع الإلكترونات عبر الزجاج. وعندما تتحرك هذه الإلكترونات في الزجاج، فإنها تضخ إلكترونات ذرات الإربيوم جاعلة إياها تصدر الضوء. وفي هذه الحالة يقوم الحصر الكمومي في البلورات النانوية بدور متواضع نسبيًا وهو تحسين موصلية الزجاج. وهكذا ينخفض الجهد اللازم لتحقيق جريان الإلكترونات. ومع أن تقنية الديودات الضوئية هذه مفيدة جداً، فإنها تنتج ضوءاً منتثراً (عبر الإصدار التلقائي)، بدلاً من ضوء الليزر الذي يتولد بالإصدار المحثوث. وعلى كل حال فإن الباحثين في مركز الإلكترونيات الميكروية يتوقعون تقديم عرض نموذج تجريبي لتوليد الإشعاع الليزري الحقيقي في سيليكون مطعّم بالإربيوم في وقت قريب.

مؤخرا، رصدت مجموعة «L. سو» [في جامعة براون] إصدار إشعاع ليزري عند درجات حرارة منخفضة (-230°C)، وهذه درجة حرارة منخفضة جداً بالنسبة إلى الاستخدام العادي) في قطعة سيليكون ذات بنية نانوية (*انظر الشكل في الصفحة 73*). لقد حصلوا على هذا الأثر أولاً بتشكيل مصفوفة من عدد كبير من الثقوب في المادة متوضعة بشكل قريب بعضها من بعض (يبعد أحدها عن الآخر بمقدار 110 نانومتر) على سطح فيلم رقيق من السيليكون، ثم بضخ هذه الثقوب ضوئياً. لقد عزا «سو» وفريقه إصدارات الليزر التي رصدوها إلى إلكترونات متوضعة على عيوب بلورية تحدث بشكل طبيعي على السطوح البلورية لبنى السيليكون النانوية. ثم عزوا الإصدارات العالية إلى عدم التعيين الكمومي في الاندفاع والناتج من التقييد الموضعي الشديد جدا للإلكترونات. توفر هذه البنى إمكانيات مثيرة

(*) Teaching Silicon to Lase

تشغيل ليزر سليكوني(*)



يستخدم ليزر رامان السيليكوني حزمة ضوئية لإثارة الموجات الاهتزازية الذرية (الفونونات، وهي غير مبينة في الشكل) في التجويف الليزري السيليكوني، وهذه بدورها تضخم الفوتونات الضعيفة التي ينتجها السيليكون. وتردّ المرايا العاكسة جزئياً بعض الفوتونات وتعيدها عبر الوسط، حيث تحث مزيداً من الإصدارات الفوتونية. (وفي الوقت نفسه يزيل ديود الأزواج الإلكترونية غير المرغوب فيها التي لولا ذلك لأضعفت الضوء الصادر). يندمج شلال الفوتونات الناتج في حزمة مترابطة من الضوء الوحيد طول الموجة هي الحزمة الليزرية.

لليزرات نانوية من السيليكون لا تستثمر الليزرة الضوئية في السيليكون فحسب، بل قابلية العنصر لبعمل كمرايا ومرشحات معقدة تستطيع أن تتعامل مع الضوء المتولد. مثل هذه الأجهزة يمكن أن تكون مفيدة في شبكات الاتصالات في المستقبل [انظر «*البلورات الفوتونية: أشباه موصلات الضوء*»، **العلوم**، العدد 4 (2002)، ص 58]

السيليكون يتعلم إصدار الإشعاع الليزري(**)

إن ضخ إلكترونات إلى عصابة الطاقة العليا في بلورة شبه موصلة، ليس هو الطريقة الوحيدة لتضخيم الضوء؛ إذ يتبع الباحثون طرقاً أخرى في سبيل صنع ليزر سيليكوني. فمثلاً إذا أضيفت طاقة إلى الفونونات في شبه موصل بلوري، فإن حزمة ضعيفة من الضوء تعبر هذه الشبكة البلورية يمكنها أن تلتقط طاقة الفونونات هذه وتصبح مضخمة، وإعادة بعض الضوء المضخم ثانية إلى البلورة تجعلها تصدر إشعاعا ليزريا.

في عامي 2002 و 2003، وبدعم من **وكالة مشاريع الأبحاث الدفاعية المتقدمة** Defense Advanced Research Projects Agency، بينت مجموعتنا [في جامعة كاليفورنيا بلوس انجلوس] أن شيبة من السيليكون يمكن أن تولد الضوء، وتضخمه باستخدام هذه التقنية. وفي عام 2004 قدم فريقنا أول ليزر سيليكوني. فكما في ليزر ميامان، ضخخنا جهازنا ضوئياً. وهذه سيرورة غير فعّالة عادةً ولكن ما يثير الدهشة أن جهازنا السيليكوني حوّل طاقة الضخ إلى ضوء بكفاءة قريبة من كفاءة الليزرات التقليدية الحالية. وبعد هذا بقليل قمنا بغرس جهاز الليزر في ديود، ونجحنا في تشغيله وفصله كهربائياً.

يسمي العلماء التأثير المتبادل للضوء مع الفونونات **مفعول رامان** Raman effect، وقد استخدموه بشكل واسع في أواخر الستينات وفي السبعينات للتحري عن الخواص الفيزيائية للعديد من المواد ومن بينها السيليكون. وأخيرًا سخّر العلماء هذا المفعول لجعل الألياف الضوئية تعمل مضخمات وليزرات. ولكن نظراً لأننا بحاجة إلى عدة كيلومترات من هذه الألياف لهذا الغرض، فقد فشل الباحثون السابقون في رؤيته وتحقيق طريقة عملية للحصول على شيبة سيليكونية ليزرية. لكن فريقنا أدرك أن الجميع غفلوا عن حقيقة أن مفعول رامان في السيليكون يمكن أن يكون أكبر بنحو 10000 مرة مما هو عليه في الألياف الضوئية التي تصنع من الزجاج. وهذه الاستجابة الأكبر

(*) Running Silicon Laser

(**) Silicon Learns to Lase

من المفاجئ أن جهازنا السيليكوني حول الطاقة المضخوخة إلى ضوء بكفاءة توازي كفاءة الليزرات التقليدية.

بكثير تأتي من البنية الذرية المرتبة بشكل جيد في بلورة السيليكون (وأخيرًا، صفة متأصلة في السيليكون تساعد على إمكانية إصدار الإشعاع الليزري). في حين أن الترتيب الذري العشوائي في الزجاج اللابلوري للألياف الضوئية يُبقي مفعول رامان صغيرا.

يتطلب ليزر رامان ضخاً ضوئياً. ولتجنب توليد إلكترونات في عصابة الطاقة العليا للسيليكون التي تعيق إصدار الضوء (مشكلة امتصاص حوامل الشحنات الحرة)، قام فريقنا بإثارة السيليكون مستخدماً الأشعة تحت الحمراء ذات الطول الموجي من رتبة 1500 نانومتر. لقد أبقت هذه التقنية طاقة الفوتون أقل من عرض المجال المحظور، وهكذا بقيت غير كافية لرفع الإلكترون إلى العصابة العليا. لكن قد يتشارك فوتونان أحياناً في طاقتهما ويتمكنان من رفع إلكترون إلى العصابة العليا. ومع أن عدد هذه الإلكترونات المضخوخة بهذه الطريقة قليل نسبياً، فإنها تضعف طاقة المنظومة.

ليست ليزرات رامان هي الوحيدة المعرضة لهذا النوع من فقدان الطاقة. فقد عرض <A. كايتا> و <M. ليبسون> [من جامعة كورنل] في عام 2006 جهازاً يمكن أن يكون مفيداً لتضخيم الضوء، وذلك بمزجه مع حزمة ضوء أكثر قوة. هذا المضخم، والليزر المكمل الذي لم يتم الحصول عليه بعد، سيعاني الخسارات نفسها، كما هو الأمر في جملة أساسها مفعول رامان.

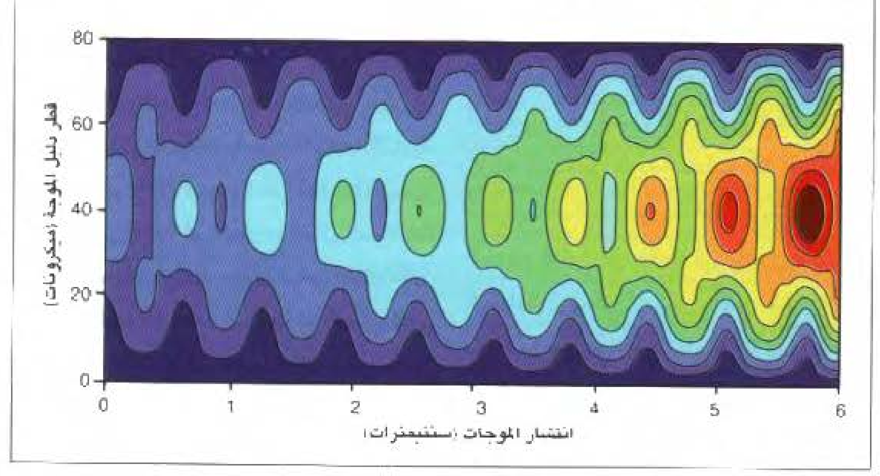
لتجنب مثل هذه الخسارات، قمنا بتشغيل ليزرنا الأول بشكل نبضي لم يسمح للإلكترونات بأن تتراكم وتستنزف طاقة المنظومة. ويمكن الوصول إلى ليزر يعمل بشكل مستمر بتطبيق حقل كهربائي (يولد بواسطة ديود مجاور) يقوم بجرف الإلكترونات المتبقية بعيداً. وقد اقترح الباحثون [في جامعة هونگ كونگ الصينية] تجريب هذه الطريقة، وبين <H. رونگ> والعاملون معه [في الشركة إنتل] ذلك عملياً في عام 2005. وتشير الأبحاث الحالية إلى أن هذه الطريقة فعالة بشكل جزئي فقط، لأن المعدل الذي تُزال به الإلكترونات سيكون محدوداً بالسرعة العظمى التي يمكن أن تصل إليها الإلكترونات في السيليكون (1/1000 من سرعة الضوء)، ولإنجازها تحتاج ايضا إلى طاقة كهربائية كبيرة. ولحسن الحظ، فنحن نعرف بعض الحيل التي تستطيع تحسين كفاءة الليزر السيليكوني. فقذف السيليكون ببروتونات أو إضافة مقادير صغيرة من البلاتينيوم سيعمل على إجبار الإلكترونات على العودة بسرعة إلى عصابة الطاقة الدنيا بدلاً من أن تقوم حوامل الشحنات الحرة بامتصاص الفوتونات القليلة.

وهذه الإجراءات تقلل من عدد الإلكترونات في العصابة العليا. وهذا بدوره يقلل من إعادة امتصاصها للضوء. وهكذا فإن سحب الإلكترونات يحل جزءاً من المشكلة فقط، ولكن الجهاز مازال يفقد طاقة الضخ عندما تتولد هذه الإلكترونات من دون قصد. وباستخدام الحيلة التي تتحكم في عمل الخلايا الشمسية، أوضح فريقنا في عام 2006 أن ليزرات رامان السيليكونية يمكن أن تولد قدرة كهربائية، وذلك بحصد الطاقة المضخوخة الضائعة. إن الإلكترونات الحرة، التي تولدت بامتصاص فوتونين من دون قصد، تجري عبر السيليكون لتولد الكهرباء. لقد تعلمنا أنه يمكننا ترتيب جريان الإلكترونات بالطريقة التي يكون فيها استهلاك الطاقة في الجهاز (وهو حاصل جداء التيار الكهربائي في الجهد) سالباً،

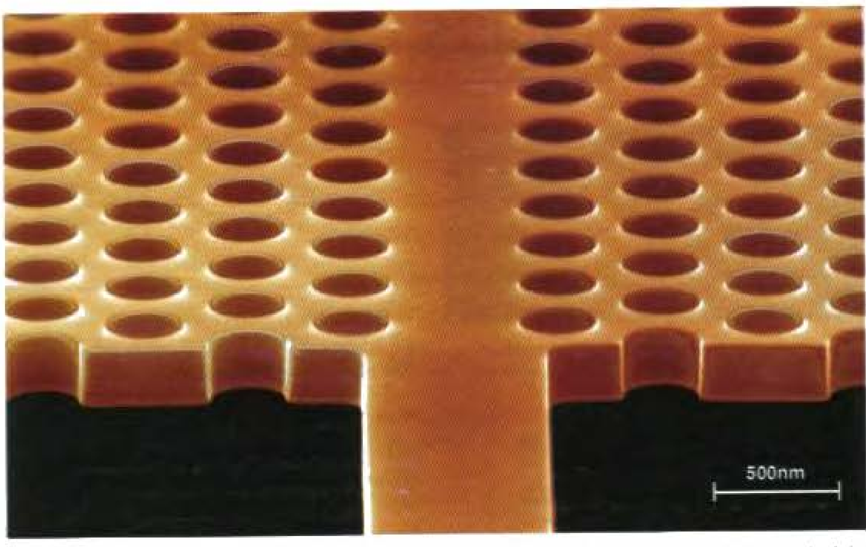
مضخم الأخيلة الليزري السيليكوني(*)

في ليف ضوئي (أو دليل موجة) مقطعه العرضي أكبر كثيراً من الطول الموجي لبعض الضوء الوارد، يبتعد أي شكل ضوئي ويقترب من الوضوح لدى سيره عبر الأنبوب الضوئي نتيجة للتداخل البنّاء والهدّام بين الموجات الضوئية التي تنعكس على جدران دليل الموجة. ويتضافر مفعول التبئير والتضخيم الضوئي لتبئير وتضخيم خيال ما في الوقت نفسه، في حين يمر الضوء في دليل الموجة (الألوان الأكثر حرارة *باتجاه اليمين*).

يطور الباحثون في جامعة كاليفورنيا بلوس أنجلس وفي نورثروب كرومان بصورة مشتركة جهازا يضخم فيه مفعول رامان (تأثر الفوتونات والفونونات) خيالاً ضوئياً لدى تقدمه خلال دليل موجة سليكوني سميك. مضخم الأخيلة هذا ينبغي أن يحسن حساسية الاستشعار عن بُعد remote sensing المبني على الليزر، وكذلك منظومات تشكيل الأخيلة التي يستخدمها العلماء لمراقبة البيئة.



(*) Silicon Laser Image Amplifier



كشف فريق الباحثين «جيمس سو» [في جامعة براون] عن الليزرة عند درجة حرارة منخفضة في غشاء رقيق من السليكون مشابه لذلك الظاهر في الأعلى. يحتوي سطح جهاز الفريق على ثقوب أبعادها نانوية، يبعد أحدها عن الآخر 110 نانومتر فقط. تحدث الليزرة بسبب كون الإلكترونات محصورة كمومياً في أقفاص إلكترونية على سطح السيليكون

وهذا يعني أنه في الحقيقة يولد طاقة. ويمكن للطاقة الكهربائية المولدة أن تقوم بتشغيل الدارات الإلكترونية الموجودة على الشيبة نفسها.

وفيما بعد، بينت مجموعة باحثينا أن هذه الصعوبة تتلاشى كلياً إذا بدأنا بضخ ضوء ذي طول موجة أطول من 2300 نانومتر تقريباً. إن طاقة الفوتون الناتج صغيرة جداً لدرجة أن زوجاً من الفوتونات لا يمتلك طاقة كافية لرفع إلكترون إلى العصابة العليا، وهذا أمر لن يكون مفيداً في ليزر رامان. لقد وجدنا أن السيليكون يصبح وسطاً رائعاً لإصدار الإشعاع الليزري، وربما واحداً من أفضلها، عندما يُضخ بواسطة الأشعة تحت الحمراء التي يراوح طولها الموجي بين 2300 و 7000 نانومتر (النقطة التي تبدأ عندها أشكال أخرى من تأثيرات مؤذية بالظهور). ويقع هذا الطيف في مدى أبعد من مدى الليزرات شبه الموصلة الموجودة، ولهذا فإن تقنية ليزر السيليكون تسمح بتطوير تطبيقات جديدة. ومن بين جميع المواد الليزرية، يقدم السيليكون واحداً من أفضل الأوساط التي تجمع بين الموصلية الحرارية (لتبديد الحرارة غير المرغوب فيها) والمقاومة ضد التخريب الناجم عن مستويات عالية من الطاقة الضوئية، جاعلةً إياه نموذجياً لتوليد حزم ليزرية فائقة الشدة.

لقد طور العلماء أيضاً طريقة هجينة واعدة لإنتاج ليزر من السيليكون تعتمد على إضافة قطعة من زرنيخيد الگاليوم أو فسفيد الأنديوم إلى سطح ركازة سيليكونية. وكان الباحثون في السيليكون تقليدياً يقاومون التقنيات الهجينة، لأن إضافة مواد أخرى تغير الخواصّ الكهربائية للسيليكون. ولذلك يُنظر إلى هذه المواد على أنها ملوثات. لكن النتائج المشجعة الحديثة التي حصلت عليها مجموعات عمل في جامعة متشيگان في آن آربور وأيضاً بشكل منفصل فريق من الباحثين في جامعة كاليفورنيا بسانتا باربرا، أدت إلى تجديد الاهتمام بهذه المقاربة. فإذا استطاع الباحثون التغلب على مشكلات عدم توافق المواد، أمكن لهذه الطريقة أن تقدم حلاً تجارياً آخر لليزر الذي أساسه السيليكون في الأمد القريب.

لقد بدأت المتابعة الدؤوبة لليزر السيليكوني تعطي أُكلها أخيراً. ويبدو أن هذا المجال قد وصل أخيراً إلى النقطة الحرجة التي ستسمح للسيليكون بتحدي مواد الليزر التقليدية. ويجب أن يجعل هذا التقدم تقارب الإلكترونيات والفوتونيات أمراً محتوماً. ومع أنه من المبكر معرفة المسار الدقيق الذي ستأخذه هذه التقانة الإلكترونية الضوئية، فإن التطبيقات الجديدة التي ستصبح ممكنة بواسطة ليزر السيليكون سيكون لها، غالباً، انعكاس كبير على حياتنا اليومية. ■

المؤلف

Bahram Jalali

أستاذ الهندسة الكهربائية في مدرسة هنري صاموئيل للهندسة والعلوم التطبيقية بجامعة كاليفورنيا، لوس أنجلس. وهو أيضاً وكيل مركز العلوم في كاليفورنيا. يمضي جلالي معظم وقته الترفيهي بالإبحار مع أولاده الثلاثة على الشاطئ الجنوبي لكاليفورنيا.

مراجع للاستزادة

Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein. Abraham Pais. Oxford University Press, 1982.

The Incredible Shrinking Transistor. Yuan Taur in *IEEE Spectrum,* Vol. 36, No. 7, pages 25–29; July 1999.

Demonstration of a Silicon Raman Laser. Ozdal Boyraz and Bahram Jalali in *Optics Express,* Vol. 12, No. 21, pages 5269–5273; October 2004.

Computing at the Speed of Light. W. Wayt Gibbs in *Scientific American,* Vol. 291, No. 5, pages 80–87; November 2004.

Optical Gain and Stimulated Emission in Periodic Nanopatterned Crystalline Silicon. S. G. Cloutier, P. A. Kossyrev and J. Xu in *Nature Materials,* Vol. 4, No. 12, pages 887–891; December 2005.

Optical Interconnects: The Silicon Approach. Edited by L. Pavesi and G. Guillot. Springer Series in Optical Sciences. Springer, 2006.

Silicon Photonics: The State of the Art. Graham Reed. John Wiley & Sons, 2007.

Scientific American, February 2007

عروض ومراجعات كتب

الكون الذكي[*]

كتابان جديدان يقولان إن الوقت قد حان لإسقاط نظرية الأوتار[1]



لربما أخذ الصبر بالنفاد مع نظرية الأوتار.

المشكلة في الفيزياء: ارتقاء نظرية الأوتار وسقوط علم وما يلي ذلك

تأليف <ل. سمولين>

THE TROUBLE WITH PHYSICS: HE RISE OF STRING THEORY, THE FALL OF A SCIENCE, AND WHAT COMES NEXT
by Lee Smolin
Houghton Mifflin, 2006

ليست حتى خاطئة: فشل نظرية الأوتار والبحث عن وحدة قوانين الفيزياء

تأليف <P. فويت>

NOT EVEN WRONG: THE FAILURE OF STRING THEORY AND THE SEARCH FOR UNITY IN PHYSICAL LAW
by Peter Woit
Basic Books, 2006

يشير هذان الكتابان إلى عكس ما يطرحه حاليا معظم الباحثين في نظرية الأوتار، حيث يخلصان إلى أن سُعار البحث في الأوتار **والتغشيات**[2] وفي **الأبعاد المعقوصة**[3] هو مجرد بحث سطحي لا عمق فيه. إنه حشر للرموز لا يؤدي إلى فهم الكون أكثر مما يؤدي إليه النثر المؤلف عشوائيا.

لا يكتفي هذا التقييم القاسي لنظرية الأوتار - وهي النظرية التي تحاول الجمع بين النسبية العامة والميكانيك الكمومي - بالقول إنها لم تخضع للاختبار وإنما هي غير قابلة للاختبار إطلاقا، غير قادرة على التنبؤ بما يمكن التحقق منه تجريبيا. ولما كان من غير الممكن التحقق من صحة نظرية الأوتار الفائقة، فإنها ستؤول «بشكل ما إلى **بلد عجائب ميتافيزيائي**[4].» حسب تعبير <B. ريتشتر> [الرئيس الفخري لمركز المسرع الخطي في ستانفورد]. وهذا ما يدفع نقادها إلى التذمر قائلين: «إن العمل مازال يجري فيها على قدم وساق وكأنها اللعبة الوحيدة المتاحة.»

«إن سيطرة نظرية الأوتار على العمل الأكاديمي تلزم الفيزيائي النظري الشاب بالانضمام إلى هذا المجال في البحث، وإلا فإنه سيضحّي بمستقبله المهني.» هذا ما جاء في كتاب <L. سمولين> [الفيزيائي بمعهد بيريمتر للفيزياء النظرية] بعنوان «*المشكلة في الفيزياء*» ويضيف «قال لي بعض نظريي الأوتار إنهم يشعرون أنهم مضطرون إلى العمل في نظرية الأوتار سواء أكانوا يؤمنون بها أم لا؛ ذلك أنه يُنظر إليها كمفتاح الحصول على منصب أستاذ جامعي.»

وبطبيعة الحال، فإن الحجة المضادة هي أن سيطرة نظرية الأوتار ناتجة من إدراك معظم النظريين أنها المقاربة الواعدة حقا - إن رؤية الأوتار المهتزة وهي تعزف التناغم الكوني جميلة إلى حد يجعل النظرية صحيحة بالضرورة. إلا أن هذه الميزة أصبحت هي نفسها موضوعا للتساؤل. «فما يلبث المرء - بعد أن بدأ بتعلم تفاصيل نظرية الأوتار الفائقة ذات الأبعاد العشرة، وتعلم **شطب الشذوذ**[5] **وفضاءات <كالابي-ياو>**[6]، الخ - أن يتحقق من أن صلة رنة الوتر ونغماته الموسيقية هي في الواقع مجرد صلة شعرية.» هذا ما ورد في كتاب <P. فويت> [مدرس الرياضيات بجامعة كولومبيا] بعنوان: فشل نظرية الأوتار. وهو يرى أن اللف والدوران اللذين يتطلبهما إخفاء الأبعاد الإضافية، التي لا وجود لها على ما يبدو، أدخلا بُنًى «في غاية التعقيد» و«شنيعة إلى أقصى حد.»

سيعترض فيزيائيون عديدون على هذا الحكم القاسي. لكنه لا يجوز صرف النظر عن هذين الكتابين بحجة نقدهما اللاذع. فكل من <سمولين> و<فويت> يقرّ بالتقدم المهم الذي أحرزته الرياضيات نتيجة تفحصها للأوتار الفائقة؛ ولكن ما من نظرية مناسبة تلوح في الأفق. ولذا فهما يلحان على ضرورة الانتقال إلى غيرها. ويقول <سمولين> «يبدو أن جميع المهتمين بالفيزياء الأساسية يتفقون على الحاجة إلى أفكار جديدة.» ويضيف «إننا نفتقد أمرا كبيرا.»

لقد بدأ بعض النظريين في السبعينات من القرن الماضي، بعد أن وجدوا أنفسهم عاجزين عن استيعاب قوى الطبيعة الأربع في وعاء واحد، بإضافة فضاءات جديدة، كالفضاء ذي الأبعاد السبعة الذي - على ما يبدو - يتطلبه توحيد القوى. ويمكن باستعمال بعض الحيل الرياضياتية «رصّ» هذه الأبعاد (غير المرئية) وإخفاؤها في شقوق النظرية. لكن كان هناك عدد لا نهاية له من الطرق للقيام بذلك. وقد يستطيع أحد هذه الترتيبات وصف هذا الكون. ولكن أي واحد منها؟

لقد تحول يأس الفيزيائيين إلى إثارة عندما اختزلت الإمكانات إلى خمس ثم إلى ابتهاج في أواسط التسعينات عندما تقوقعت هذه الإمكانات الخمسة في ما يسمى **نظرية تغشية** M Theory، التي تَعِد بأن تكون الطريقة الصحيحة، وقد تعدى ذلك إلى الأمل بإمكانية التحقق التجريبي من هذه النظرية. وقد كتبتُ أنا شخصيا حينذاك مقالة تحمل عنوانا أصبح محرجا الآن «لقد وجد الفيزيائيون في نهاية المطاف طريقة لاختبار نظرية الأوتار الفائقة.»

حدث هذا قبل ستة أعوام. وها نحن نسمع <سمولين> و<فويت> ينبئان بعودة الموضوع إلى المربع الأول. توحي الأبحاث الحديثة بوجود 10^{500} نظرية تغشية، جميعها صالحة تماما، وتوصف كل واحدة منها فيزياء مختلفة عن الأخرى. وهكذا أصبحت «نظرية كل شيء،» كما يقول <سمولين> «نظرية لا شيء.»

وقد خلص بعض نظريي الأوتار أمام هذه

(*) THE INTELEGANT UNIVERSE
(1) string theory
(2) branes
(3) curled-up dimensions
(4) metaphysical wonderland
(5) anomaly cancellation
(6) Galabi-Yau spaces

الحرية المطلقة في الاختيار، إلى القول «إن الكون ليس أنيقا وإنما اتفاقيا»[1]. وإذا كان الأمر كذلك فإنه لا معنى لمحاولة تفسير قيمة الثابتة الكونية تماما مثلما لا معنى للبحث عن سبب رياضياتي عميق لكون إشارات الوقوف ثمانية الأضلاع أو لكون عدد الفقرات عند الإنسان 33 فقرة.

ويرفض أغلب الفيزيائيين **قدرية ما بعد الحداثة**[2] هذه ويأملون في حدوث طفرة تنير الطريق إلى قمة الجبل. فقد احتشدوا في قاعة الشعب الكبرى ببكين، في صيف عام 2006، بمناسبة انعقاد **مؤتمر الأوتار**[3]، للاستماع إلى «ستيفن هوكينك» معلنا: «إننا على وشك الإجابة عن سؤال بالغ القدم: من أين أتينا؟ ولماذا نحن هنا؟» ويأملون ألا يكون الجواب: هكذا. ■

عرض ومراجعة

George Johnson

له كتب عديدة، منها: «اللهب في العقل: العلم والإيمان والبحث عن الانتظام» و«الجمال الغريب: «موري گيلمان» والثورة في فيزياء القرن العشرين».

(1) the universe is not elegant but accidental

(2) postmodern fatalism

(3) strings conference

هل الجمال حقيقة والحقيقة جمال؟[-]

كيف يُطبّق بيت شعر شهير لـ«كيتس»[1] في الرياضيات والعلم.

لِمَ الجمال هو حقيقة: تاريخ التناظر

تأليف «I. ستيوارت»

WHY BEAUTY IS TRUTH: A HISTORY OF SYMMETRY
by Ian Stewart
Basic Books, 2007

عنوان كتاب «I. ستيوارت» (الذي ألفه إضافة إلى أكثر من 60 كتابا آخر) مقتبس، بالطبع، من آخر بيتين مبهمين من «**قصيدة لـ كيتس**»[2]، هما:

«الجمال هو الحقيقة، والحقيقة هي الجمال. هذا كل ما تعرفه على الأرض. وهذا كل ما أنت بحاجة إلى معرفته.»

لكن ما هو الشيء على الأرض الذي كان يعنيه «كيتس»؟ لقد وصف الشاعر «T. S. إليوت» هذين البيتين بأنهما «لا معنى لهما» وأنهما يحدثان «تشويها خطيرا في قصيدة جميلة.» وقد استهل «J. سايمون»[3] نقده لشريط سينمائي بقوله: «إحدى أكبر مشكلات الفن ـ بل ربما أكبر مشكلاته على الإطلاق ـ هي أن الحقيقة ليست الجمال، والجمال ليس الحقيقة. ثم إنه ليس صحيحا أن هذا كل ما نحن بحاجة إلى معرفته.» ويهتم «**ستيوارت**»[4] بالكيفية التي ينطبق بها بيتا شعر كيتس على الرياضيات. وقد كتبت «E. **ميلّي**»[5] تقول: «"إقليدس"، وحده، هو من نظر إلى الجمال مجردًا.» وفيما يخص الرياضياتيين، فإن لهم موقفا من المبرهنات العظيمة والبراهين العظيمة، كبرهان إقليدس الأنيق، الذي يثبت أن مجموعة الأعداد الأولية غير منتهية، شبيها بموقف «B. **راسل**»[6] منها، عندما وصف جمال هذه المبرهنات والبراهين بأنه «بارد وصارم»، وأنه مماثل لجمال الأعمال الخالدة في النحت.

والفصول العشرة الأولى من كتاب «ستيوارت»، التي سردها بأسلوبه الهادئ الذي عُرف عنه، تعرض تاريخا حقيقيا للرياضيات، وهو يركز فيها على مفهوم التناظر. فعندما تُجري عملية على شيء رياضياتي بطريقة تجعله يبدو بعد العملية كما كان قبلها، تكون كشفت النقاب عن تناظر. وثمة عملية بسيطة هي الدوران. فمهما حركت وقلّبت كرة التنس، فلن تغير شكلها. ويقال عندئذ إنها تعرضت **لتناظر دوراني**[7]. فللحرف اللاتيني "H" تناظر دوراني قدره 180 درجة، لأن الحرف لا يتغير عندما تقلبه رأسا على عقب. للحرف أيضا **تناظر انعكاسي مرآتي**[8]، لأنه يظهر على حاله دون تغيير عند النظر إلى صورته في المرآة. وللصليب المعقوف تناظر دوراني قدره 90 درجة، لكنه يفتقر إلى التناظر الانعكاسي المرآتي، لأن صورته في المرآة تغير اتجاهها.

ويرتبط أي نوع من التناظر «**بزمرة**» group ويشرح «ستيوارت» مفهوم الزمرة بأسلوب بسيط عن طريق النظر في العمليات التي تُجرى على مثلث متساوي الأضلاع. فإذا دورته بزاوية قدرها 60 درجة في أي اتجاه، فإنه يظهر على حاله. وثمة عملية لكل عملية «عكسية» تلغي العملية الأولى. تصور رؤوس مثلث رمزنا إليها بالأحرف A، B، C. إن تدوير المثلث بزاوية قدرها 60 باتجاه دوران عقارب الساعة يغير من مواقع الرؤوس. وإذا اتبعنا هذا التدوير بتدوير مماثل بالاتجاه المعاكس، عدنا إلى المواقع الأصلية لتلك الرؤوس. وإذا لم تفعل شيئا للمثلث، فإننا نسمي ذلك **عملية «محايدة»**[9]. وتؤلف مجموعة كل التحويلات التناظرية للمثلث زمرته.

يبدأ تاريخ «ستيوارت» بالرياضيات البابلية واليونانية. ويعرض مفاهيمها الأساسية بطرائق تسمح لطلبة السنوات

كان التناظر، في وقت من الأوقات، مرادفا للجمال ـ هذا ما أورده «W. بليك» عندما قال: «أيها النمر! أيها النمر المتوهج الساطع في غابة الليل، يا لعينيك وقوائمك الخالدة الذكر التي تصوغ تناظرك الرهيب.»

(-) IS BEAUTY TRUTH AND TRUTH BEAUTY?

(1) John Keats (1795-1825): شاعر إنكليزي يُعدّ واحدا من أعظم الشعراء الإنكليز.

(2) عنوانها: Ode on a Grecian Urn.

(3) وهو عالم رياضيات مشهور في جامعة وارك بإنكلترا، وكاتب سابق لعمود «التسلية بالرياضيات» في هذه المجلة.

(4) مؤلف الكتاب، وهو عالم رياضيات مشهور من جامعة وارك بإنكلترا، وكاتب سابق لعمود «التسلية بالرياضيات» في هذه المجلة.

(5) Edna Millay (1892-1950): شاعرة وروائية أمريكية.

(6) Bertrand Russell (1872-1970): فيلسوف بريطاني وعالم بالمنطق ومصلح اجتماعي، حاز جائزة نوبل في الأدب عام 1950.

(7) rotational symmetry

(8) mirror reflection symmetry

(9) "identity" operation

الأولى من المرحلة الثانوية بفهمها. ومع متابعة قراءة هذا التاريخ، تصبح الرياضيات ببطء تقنية أكثر فأكثر. وبخاصة عندما نصل إلى **الأعداد العقدية**[1] complex numbers وما نتج منها: الأعداد **فوق العقدية**[2] و**أعداد كايلي**[3]. ويختتم هذا التاريخ باكتشافات <S. لي> Sophus Lie، الذي سميت **زمر لي** Lie groups باسمه، وبأعمال عالم رياضيات ألماني أقل شهرة، اسمه <J. كيلينك>[4]، الذي صنف زمر لي. وفي هذا القسم التاريخي كله، يمزج <ستيوارت> بمهارة الرياضيات في رسوم تخطيطية شائقة لأولئك الرياضياتيين الذين عرض إسهاماتهم.

ولا ينتقل <ستيوارت> إلى الفيزياء، وشرح كيف أن التناظر ونظرية الزمر صارا أداتين ضروريتين للفيزياء، إلا في النصف الثاني من الكتاب. وثمة فصل عن <A. أينشتاين> يعرض مزيجا رائعا من نظرية النسبية الابتدائية وبعض التفصيلات عن حياة <أينشتاين>. بعد ذلك، يقدم المؤلف **نظرية الجسيمات** particle theory والميكانيك الكمومي، وعدة صفحات عن **الأوتار الفائقة**[5]، وهو موضوع يعد، في هذه الأيام، من أكثر المواضيع إثارة في الفيزياء النظرية. و<ستيوارت> متشكك قليلا في **نظرية الأوتار**[6]، التي ترى في جميع الجسيمات الأساسية شعيرات دقيقة، لا يمكن تخيلها، من طاقة متذبذبة يمكن أن يكون لها نهاية مفتوحة أو مغلقة مثل شريط مطاطي. إنه لا يورد ذكر كتابين حديثين (*راجع في عدد الشهر 2006/9 من مجلة ساينتفيك أمريكان*) يوجهان نقدا مريرا إلى نظرية الأوتار. فالمؤلف <L. **سمولين**>[7] لكتاب *The Trouble with Physics* يشجب نظرية الأوتار، لأنها برأيه «ليست نظرية على الإطلاق»، بل مجرد خليط غير منظم من التخمينات الغريبة التي تبحث عن نظرية قابلة للحياة. أما كتاب <P. **ووِيت**>[8]، الذي عنوانه «*ليست حتى خاطئة*»[9]، فقد اقتبس هذا العنوان الفيزيائي النمساوي العظيم <W. **باولي**>[10]، الذي وصف مرة نظرية بأنها سيئة للغاية بحيث إنها «ليست حتى خاطئة».

تُرى، هل نظرية الأوتار جميلة حقا؟ يظن مروجوها أنها كذلك. ويعتقد <سمولين> و<وويت> أن استيعابها حديثا ضمن تخمين أوسع وأغنى، اسمه **النظرية M**[11]، حول الجمال السابق للأوتار إلى بُنى رياضياتية تشبه في قبحها **الدوائر الصغيرة**[12] التي ابتكرها <بطليموس> لتفسير المدارات التي تسلكها الكواكب في دورانها حول الأرض.

لنعد ثانية إلى أبيات الشاعر <كيتس> السيئة السمعة. في رأيي إن <J. سايمون> على حق: فحتى البراهين الرياضياتية الجميلة يمكن أن تكون خاطئة. ففي عام 1879، نشر السير <A. كمپ> إثباتا لمبرهنة خريطة الألوان الأربعة. وقد اعتُبر هذا الإثبات أنيقا طوال عشر سنوات؛ لكنه، وللأسف، لم يكن كذلك. ثم نشر واضع الأحجيات الإنكليزي المشهور <H. دوديني> برهانا خاطئا أقصر بكثير، وحتى أبرع بكثير.

وفي المجلة *The New Ambidextrous Universe*، أكتب (المؤلف) عن **النظرية الدوامية للذرات**[13]. وقد كان لهذه المخمنة، التي كانت شائعة في القرن التاسع عشر، شَبَهٌ شديد بنظرية الأوتار الفائقة. فكانت تؤكد أن الذرات لا تشبه النقاط، إذ إنها عرى دقيقة جدا من الطاقة تهتز بترددات مختلفة. إنها دوامات صغيرة جدا موجودة في **الأثير** ether، وهو مادة صلبة **لا احتكاك فيها**[14] كان يُعتقد أنها تتخلل الفضاء كله. وللذرات بنية عقد **ووصلات**[15]، تولد أشكالها واهتزازاتها خصائص المواد. وما إن تُخلق، حتى تدوم إلى الأبد.

وخلال بحثي في النظرية الدوامية للذرات، اطلعت على كثير من آراء فيزيائيين مرموقين، من ضمنهم <J. كلفن> و<C. ماكسويل>. ارتأوا أن هذه النظرية كانت أجمل كثيرا من أن تكون حقيقية. وقد نُشرت أبحاث كثيرة، وأُلفت كتب عديدة في هذا الموضوع. هذا وقادت أبحاث الرياضياتي النمساوي <P. تيت> في الذرات الدوامية إلى إحراز تقدم في **نظرية العقد**[16]. وقد تنبأ <تيت> بأن تطوير الأسس الرياضياتية لهذه النظرية سيستغرق عدة أجيال. ومع أن النظرية الدوامية تبدو جميلة، فقد ثُبت أنها طريق رائع لا يوصل إلى أي مكان.

ويختتم <ستيوارت> كتابه بحكمتين، أولاهما أن «الجمال في الفيزياء لا يؤكد الحقيقة تلقائيا، لكنه يساعد على الوصول إليها»، والأخرى هي أن «الجمال في الرياضيات هو بالضرورة حقيقي ــ لأن كل ما هو خاطئ لا بد أن يكون قبيحا». وأنا بدوري أوافق على صحة الدعوى الأولى دون الثانية. فقد رأينا أن برهاني <كمپ> و<دوديني> كانا غاية في الجمال، لكنهما خاطئان. إلى ذلك، ثمة مبرهنات صيغت بكل بساطة، ولكن البراهين القبيحة قد تكون البراهين الوحيدة الممكنة التي تثبت هذه المبرهنات.

سأورد مثالين حديثي العهد. فقد تطلب إثبات مبرهنة خريطة الألوان الأربعة استخراج نسخ **ورقية حاسوبية**[17] بسرعة وكثافة عاليتين تجعلان مراجعتها غير ممكنة إلا بالاستعانة ببرامج حاسوبية أخرى. ومع أنه قد يوجد برهان جميل وارد فيما يسميه <P. **إردوس**> «***كتاب الله***»[18] ــ وهو كتاب يعتقد <إردوس> أنه يشتمل على جميع مبرهنات علم الرياضيات، وأجمل البراهين عليها ــ فمن الممكن ألا يكون «كتاب الله» متضمنا هذا البرهان. وينطبق هذا الكلام نفسه على إثبات <A. وايلز> للمبرهنة الأخيرة لفيرما [انظر: «*مبرهنة فيرما الأخيرة*»، **العلوم**، العدد 1 (1999)، ص 26]. ومع أن هذا البرهان لا يعتمد على الحاسوب، فإن طوله وتعقيده الشديدين لا يسمحان بوصفه برهانا جميلا. وقد لا يوجد إثبات جميل لهذه المبرهنة. وبالطبع، يحق للرياضياتيين دائما أن يكون لهم آمال واعتقادات مغايرة.

ولما كان التناظر هو الموضوع الذي يربط بين صفحات كتاب تاريخ ستيوارت الرائع، فقد يكون من المناسب وضع مقدمة لهذا الكتاب هي مقطع شعري من قصيدة غنائية خالدة **كلها هراء نظمها <L. كارول> بعنوان** The Hunting of the Snake. هذا المقطع هو:

أعلها بشارة الخشب، ملّحها بالغراء، كثّفها
بالجراد والشريط مُبقيا أحد الأشياء الرئيسية
مرنيا للحفاظ على شكلها التناظري ■

عرض ومراجعة

Martin Gardener

واصل كتابة عمود «الألعاب الرياضياتية» طوال 25 عاما. وقد نُشر آخر كتاب له بعنوان The Annotated Hunting of the Snark في عام 2006 من قبل www.norton

(1) complex numbers أو الأعداد المركبة
(2) quaternions أو الأعداد الرباعية
(3) octonions أو cayley numbers
(4) Joseph Killing
(5) superstrings
(6) string theory
(7) Lee Smolin
(8) Peter Woit
(9) not even wrong
(10) Wolfgang Pauli
(11) M theory نظرية التغشية (التغطية)
(12) epicycles
(13) vortex theory of atoms
(14) frictionless
(15) links
(16) knot theory
(17) computer printout
(18) God's book
(19) M-theory

الأمراض المدارية المهملة[2]

يمكن مكافحة الأمراض الواسعة الانتشار في جميع أرجاء العالم الفقيرة بإنفاق ما يعادل المصروفات العسكرية لأيام قليلة.

يعج كوكبنا بالفرص الرائعة المستندة إلى العلم لتحسين رفاهية الإنسان بتكاليف زهيدة. ولكن هذه الفرص تغيب عن إدراك أصحاب القرار السياسي وعن الناس في غالب الأحيان. ومن أفضل الأمثلة على ذلك معالجة مجموعة من الأمراض المدارية المهملة التي تسبب العجز وتقتل ملايين الناس. ولكنها غير معروفة جيدا بين الأوروبيين والأمريكيين.

ويشير الخبراء اصطلاحيا إلى هذه الأمراض باسم «الأمراض المدارية المهملة»[2]: وهي أمراض مُعْدِيَة شديدة الوطأة، تنافس فيما تسببه من مرض وعجز وموت تأثيرات الإيدز والسل والملاريا (البرداء). إلا أنها أقل شهرة منها. ويعود ذلك جزئيا إلى أنها أمراض لا تصيب إلا الفقراء في المناطق المدارية.

وتنجم سبعة من هذه الأمراض عن عدوى الديدان، وهي **الديدان الشصية** hookworms، وداء **الديدان المُسلَّكة** trichuriasis، وداء **الأسكاريس (الصُّفَر)** ascariasis، وداء **البلهارسيات** schistosomiasis، وداء **التِّنِّينات** dracunculiasis أو **الديدان الغينية** guinea worms، وداء **كلابيات الذنب** onchocerciasis، وداء **الفيلاريات اللمفية** lymphatic filariasis. وتنجم ثلاثة أمراض أخرى منها عن الأوالي وهي: داء **الليشمانيات** leishmaniasis وداء **المثقبيات** trypanosomiasis وداء **شاكاس**[1] Chagas disease. كما أن ثلاثة أمراض أخرى ذات منشأ جرثومي وهي: **الجذام** leprosy و**التراخوما (الحَثَر)** trachoma و**قرحة بورولي** Buruli ulcer.

ومن بين هذه الأمراض الثلاثة عشر نجد تسعة (وهي الأمراض السبعة الناجمة عن الديدان بالإضافة إلى الجذام والتراخوما) لها تدخلات وقائية وعلاجية شافية قوية وزهيدة التكلفة وسهلة التنفيذ. وكما أوضح الرئيس <ا. كارتر> من خلال قيادته الشخصية الراسخة طوال أكثر من عشرين سنة، فإن ترشيح الماء بالقماش الرقيق يمكن أن يقلل إلى حد كبير من عبء داء التِّنِّينات. كما أن الناموسيات (الكِلل) المعالجة بمبيدات الحشرات يمكنها أن تمنع انتقال داء الفيلاريات اللمفي وأن تخفض سراية الملاريا خفضا كبيرا.

وباستثناء داء ديدان غينيا، تستطيع الأدوية أن تعالج جميع الديدان بالمداواة الروتينية القادرة على إبقاء عدد الديدان التي تصيب الفرد بالعدوى، في الحد الأدنى القابل للتحمل. فعلى سبيل المثال، ينبغي أن يعالج جميع أطفال المدارس في المناطق التي تنتشر فيها العدوى بالديدان والبلهارسيات، بالأدوية المضادة للديدان حتى ثلاث مرات في العام. وقد اندفعت الشركات المنتجة للمستحضرات الصيدلانية إلى المساهمة في ذلك. وتبرعت بالأدوية شركات ميرك وگلاكسو سميث كلاين وجونسون آند جونسون وفايزر ونوفارتس وسانوفي باستور، إلى جانب مساهمات أخرى لها لمكافحة هذه الأمراض المختلفة. وتقدم هذه الشركات كلها دعمها الصادق لتوسيع برامج المكافحة.

وقد آن الأوان الذي يجدر فيه بالحكومات أن تنضم إلى هذه الجهود أيضا. وقد خصصت حكومة الولايات المتحدة الأمريكية مؤخرا 15 مليون دولار لمكافحة الأمراض المدارية المهملة. وما هذه إلا خطوة البداية؛ إذ إنها أقل من عُشْر المبلغ اللازم للحملة الشاملة من أجل إفريقيا والذي يصل إلى نحو 250 مليون دولار كل عام. إن أفضل الاستراتيجيات هي ربط مكافحة الأمراض المدارية المهملة بمكافحة الملاريا. وبهذا سيكون بإمكان الناموسيات المعالجة بمبيدات الحشرات والعاملين الصحيين في المجتمع أنفسهم المساهمة في مكافحة كل من الملاريا والأمراض المدارية المهملة: إذ إن للملاريا وللأمراض المدارية المهملة تداخلا جغرافيا واضحا في البلدان المدارية جميعها. وإلى جانب ذلك، فإن ملايين الأطفال في إفريقيا يعانون الإصابة بطفيليات متعددة في الوقت ذاته؛ فهم ضحية الملاريا ومجموعة من الأمراض المدارية المهملة الأخرى. وتؤدي هذه العدوى المتعددة إلى أذيات وخيمة.

> إن أفضل استراتيجية لمكافحة الأمراض المدارية المهملة هي ربطها بمكافحة الملاريا.

وينبغي لأصحاب القرار السياسي في بلادنا أن يفكروا مليا بأن المكافحة الفعالة للأمراض تؤدي إلى تعزيز الاستقرار والرفاهية في العالم، بما ستسببه من تنمية اقتصادية أكثر مما تؤدي إليه الأساليب العسكرية بعد اندلاع الاضطرابات. وقد كانت الإجراءات الموجهة لمكافحة الأمراض ذات فعالية كبيرة في الماضي، حتى في أشد البلدان فقرا. فقد تم استئصال الجدري، كما انخفض عدد حالات شلل الأطفال بنسبة ألف عمّا كان عليه من قبل في جميع أرجاء العالم، بفضل الجهود التي بذلت في إعطاء اللقاحات، والتي قادها **الروتاري الدولي**[3] بشكل أساسي.

إن المكافحة الشاملة للملاريا وللأمراض المدارية المهملة معا في جميع أرجاء إفريقيا لن تُكلِّف أكثر من ثلاثة بلايين دولار كل عام، أو ما يعادل نفقات البنتاغون في يومين فقط. ولو خصَّص كل من البليون فرد في العالم الغني ثلاثة دولارات (وهي ثمن فنجان قهوة) كل عام في هذه القضية، لأمكن إنقاذ ملايين الأطفال من الموت ومن الإعاقة سنويا، ولتفادى العالم أيضا أخطارا جسيمة قد تنتج من تجاهل الأمراض واليأس الذي تسببه. وتساعد الشبكة العالمية لمكافحة الأمراض المدارية المهملة (www.gnntdc.org) التي أنشئت حديثا، على تحويل هذه الفرص إلى حقيقة واقعة. ■

المؤلف
Jeffrey D. Sachs
مدير معهد الأرض في جامعة كولومبيا.

(١) وهو شكل آخر من داء المثقبيات يصيب السبيل الناقل للدُّفعات العصبية المنبّهة لانقباض القلب.
(٢) neglected tropical diseases
(٣) Rotary International

حشيش أرضيات الملاعب(*)

العشب الطبيعي في مواجهة الحشيش البلاستيكي.

تشهد ساحات الملاعب الرياضية تنافسا قويا بين الأعشاب الطبيعية والحشائش الصنعية.

غالبا ما تؤدي ممارسات الرياضيين العابهم، وبخاصة في الأوقات التي تشهد موجات من المطر والبرد والجفاف، إلى تخريب أرضيات الملاعب العشبية. وللتصدي للضرر الذي يلحق بحشائش هذه الأرضيات، اعتمد المسؤولون عن المحافظة عليها وصيانتها بنى تحتية جديدة تسرّع في تصريف المياه المتجمعة، وتضخ في التربة تيارا من الهواء الساخن لتنشيط جذور تلك الأعشاب والمساعدة على نموها (*انظر الشكل في أعلى اليمين*).

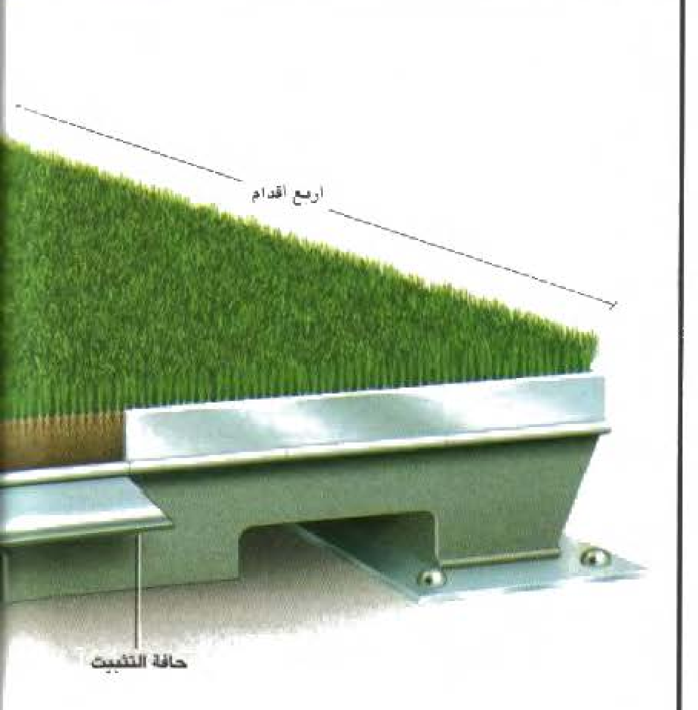
وفي أواخر ستينيات القرن الماضي بدأ استخدام الحشائش الصنعية في تغطية الأرضيات. وكان أول استخدام لها في ساحات مرصد هيوستن الفلكي، لذلك حملت اسما تجاريا هو حشيش أرضيات المرصد. ظل هذا الاسم مرادفا لكافة أنواع الحشائش الصنعية المستخدمة في أرضيات الملاعب في جميع أرجاء البلاد، وامتد هذا الاستخدام ثلاثين عاما على الرغم من شكوى اللاعبين من قساوة وطء أقدامهم عليها ومن تعرضهم لإصابات رضّيّة عند وقوعهم. وحمل العقد الماضي معه جيلا جديدا من المنتجات، صنعتها شركات مثل الشركة فيلد ترف، وتمّ تبنيها واعتمادها على نطاق واسع. واخذت هذه المنتجات تتباهى بخصلاتها البلاستيكية الأكثر نعومة وتماسكا، والأسهل مداسا والأخف وطأ، بسبب ما تحمله من حُبيبات من المطاط، أو من المطاط والرمل، بين حنيات أوراقها وبصلاتها (*انظر الشكل في أسفل اليمين*).

ويستمر الجدل قائما حول طبيعة التغطية الأفضل لأرضيات الملاعب. ففي صيف عام 2006 جددت جامعة بوردو أرضيات ملعب كرة القدم فيها مستخدمة سلالة جديدة من عشب برمودا، استُنبتت خصيصا لتتحمل درجات حرارة أكثر برودة. يقول «ل. كابيتوس» [المسؤول عن حشائش أرضيات الملاعب في الجامعة] «إن المواد الصنعية الجديدة جيدة، لكن لا شيء أفضل من العشب الطبيعي.» ويؤكد المسؤولون عن الملاعب أن معظم اللاعبين يفضلون الأرض المغطاة بالعشب الطبيعي قبل تعرضه لأحوال مناخية شديدة، حيث يجعله الجفاف قاسيا، في حين يجعله المطر زَلقا وغير منتظم. يقول «ل. فراندينا» [المسؤول عن ملعب فريق «بوفالو بيلز» في نيويورك] «إن ما يمكن أن يقام على ملاعب الولايات الشمالية بعد الشهر التاسع من السنة، عندما يتوقف العشب عن النمو، هو ألعاب تجرى في الطين، إذ تكون قد خسرتَ ملعبك لموسم كامل.» لذلك اعتمدت منشآته، حيث يكثر تساقط الثلوج، على الحشيش الصنعي لسنوات عديدة.

وللتكلفة المالية دورها في إقرار اختيار أحد نوعي التغطية، حيث تراوح القيمة المتوسطة لتكلفة التغطية بحشيش صنعي ما بين 000 500 و 000 800 دولار، أو أكثر من ذلك، في حين تراوح هذه القيمة في حالة العشب الطبيعي ما بين 000 250 و000 500 دولار. لكن هذا العشب يحتاج إلى تسميد وسقاية وتعشيب وتشذيب. ويبقى الخيارُ الشخصي معيارَ الفصل والإقرار. فقد استبدلت جامعة ولاية متشيكان في سنة 2002 وحدات من العشب الطبيعي متداخلة في ما بينها من صنع الشركة «كرين تك» بولاية جورجيا، بالحشيش الصنعي الذي كان يغطي أرضيات ملاعبها، «رغم وجود منشأة مشهورة بصنع هذه الحشائش في ولاية متشيكان.» كما يقول مؤسس الشركة «لأن العشب هو الأفضل.» كما اختار «فراندينا» [المسؤول عن ملعب فريق بوفالو بيلز] عند تجديد طبقة الحشيش الصنعي التي تغطي أرضيات الملعب في عام 2006، موردا آخر لهذا الحشيش «لأن منتجه يعطي إحساسا أفضل حين وطئه والدوس عليه.»

‹M. فيسيتي›

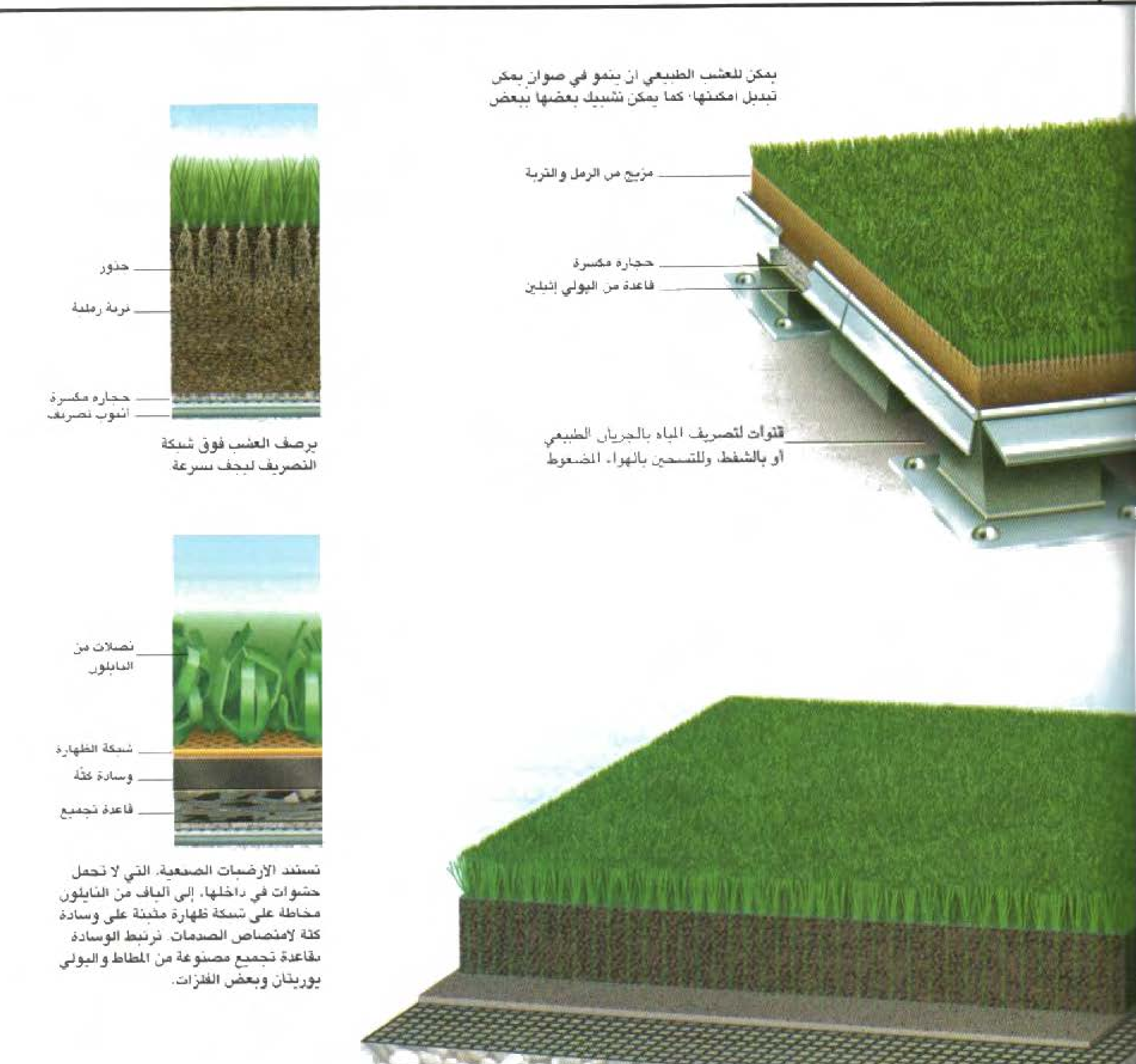
(*) STADIUM TURF





يُحمل الحشيش الصنعي، المصنوع على شكل رقعات متشابكة أو الممدد فوق صوان، على قاعدة من الحجارة المكسرة، وتعمل حشوة من حبيبات من المطاط أو من مغلف من الرمل والمطاط على حفظ نصلات الحشيش منتصبة وقائمة. أما الطبقات الظهارية الداعمة فتثبت النصلات في أمكنتها وتسمح بتصريف المياه.

- **طحن الإطارات:** تأتي الحبيبات المطاطية التي تُحشى بين أوراق الحشيش الصنعي من إطارات السيارات القديمة بالدرجة الأولى. يطحن هذا المطاط المسمى مطاط الجوار، حتى تصبح حبيباته بحجم حبات الخرز الصغيرة. وقد يبرَّد المطاط أثناء طحنه حتى درجات حرارة شديدة الانخفاض، ويعرف عندها بالمطاط القرّي، ليشكل حبيبات بحجم حبات الرمل، تكون أكثر انتظاما في تكورها مما ينتج عبوات أشد تراصا وأكثر ثباتا.
- **العشب القابل للبسط والطيّ:** في الشهر 2006/8، افتتحت جامعة «فنيكس» ملعبا جديدا (هو في الوقت ذاته ملعب فريق «أريزونا كاردينالز»، المحترف في كرة القدم الأمريكية)، وهو أول ملعب في الولايات المتحدة يمكن بسط أرضيته العشبية وطيّها. تقوم هذه الأرضية على قاعدة طولها 403 أقدام وعرضها 234 قدما، قائمة على مجموعة من السكك الفولاذية المثبتة على أرض من الإسمنت المسلح. تبسط هذه الأرضية، البالغة كتلتها 17 مليون پاوند، داخل صالة الملعب في أثناء اللعب، وتطوى في الأوقات الأخرى وتحفظ في المكان المخصص لها حيث يمكن لعشبها أن ينمو. وبذلك يمكن أن تعقد في صالة الملعب لقاءات وحفلات موسيقية وسواها. كما أن سقف هذه الصالة، المصنوع من مواد صنعية شفافة، قابل للبسط والطيّ؛ وقد أقيمت فيها مباراة الكلية في كرة القدم في الشهر 2006/1.
- **الجروح والإصابات:** يقول المدربون الرياضيون لفريق «بوفالو بيلز» (كاتب هذه المقالة واحد منهم) إنهم لم يلحظوا زيادة في تعرض اللاعبين للإصابة بالجروح على الأرضيات المغطاة بالمنتجات البلاستيكية الجديدة، وهو ما كان موضع انتقادهم في بعض الأحيان لتلك المغطاة بالمنتجات السابقة. وقد تسبب الأرضيات الجديدة أنواعا مختلفة من الرضوض التي تلحق بالأقدام والأرجل أكثر مما تسببه أرضيات العشب الطبيعي، إلا أنها لا تسبب بالضرورة جروحا أكثر منها.



يمكن للعشب الطبيعي أن ينمو في صوانٍ يمكن تبديل أمكنتها، كما يمكن تشبيك بعضها ببعض

يرصف العشب فوق شبكة التصريف ليجف بسرعة

تستند الأرضيات الصنعية، التي لا تحمل حشوات في داخلها، إلى ألياف من النايلون مخاطة على شبكة ظهارة مثبتة على وسادة كتة لامتصاص الصدمات. ترتبط الوسادة بقاعدة تجميع مصنوعة من المطاط والبولي يوريثان وبعض الفلزات.

اسألوا أهل الخبرة

كيف يقتفي الباحثون، عبر القرون، أثر دنا DNA الميتوكندرات[1] ؟[*]

يجيب عن هذا السؤال <B. إيلي> [البيولوجي في جامعة ساوث كارولاينا] بالآتي:

إذا تعرض **دنا الميتوكندرات** mtDNA للتغير، فإنه لا يتغير كثيرا من جيل إلى جيل، أو أنه لا يتغير على الإطلاق. وينتقل دنا الميتوكندرات من الأم فقط إلى أطفالها، فالآباء لا يستطيعون توريث دنا الميتوكندرات الخاص بهم.

ومع أن الطفرات تحدث في دنا الميتوكندرات، فإنها غالبا أقل من واحد في المئة في الأسلاف. لذا، فإن دنا الميتوكندرات لشخص ما ربما يطابق مثيله في السلف الأمّي المباشر (الذكري أو الأنثوي) قبل عشرة أجيال، وإنه بالإمكان استعمال هذا الإرث المشترك لربط الناس ببعضهم عبر فترة طويلة من الزمن. فمثلا، مبدئيا إذا وُجد نمط خاص من دنا الميتوكندرات في إفريقيا أمكننا عندئذ أن نستنتج أن الناس في أي مكان آخر من العالم الذين لديهم هذا النمط من دنا الميتوكندرات لهم سلف أمّي من إفريقيا أيضا.

وخلافا لمعظم الدنا، فإن دنا الميتوكندرات لا يوجد في **صبغياتنا**[2]، أو حتى في نواة خلايانا (الغلاف المركزي الذي يحتوي على الصبغيات جميعها). فالميتوكندرات هي تراكيب صغيرة محددة بغشاء، توجد في جميع الخلايا النباتية والحيوانية، وهي مسؤولة عن توليد معظم الطاقة التي تحتاج إليها الخلية كي تقوم بوظائفها. وتحتوي كل متقدرة على الدنا الخاص بها، وكذلك ماكينتها الذاتية لبناء البروتين.

وقبل أن يشرع الناس في السفر حول العالم، أدّت التغيرات النادرة التي طرأت على دنا الميتوكندرات إلى نشوء أنماط متفردة من دنا الميتوكندرات في القارات المختلفة. لذا، فإن باستطاعة العلماء أن يُرجعوا معظم أنماط دنا الميتوكندرات المعاصرة إلى القارة الأصل، وذلك بناء على قطعة من دنا الميتوكندرات - تُعرف بالرمز Hvrl - التي تعتبر المكان الأكثر ترجيحا لحدوث الطفرات. وبإمكان العلماء تحليل القطعة Hvrl ليجدوا سجلا للطفرات السابقة كافة، ذلك أن دنا الميتوكندرات نُقل من الأم إلى ابنتها ومن جيل إلى آخر. وتُعَدُّ هذه الطفرات المتراكمة الأساس المميز لدنا الميتوكندرات الذي يوجد على وجه التخصيص في كل قارة من القارات.

إضافة إلى الاختلافات الإقليمية في دنا الميتوكندرات أيضا، لذلك من المرجح أن يستقر المتحدرون من امرأة ما في أمكنة متجاورة؛ ومن ثم فإن الطفرات التي طرأت أصلا على دنا الميتوكندرات الخاص بها ستكون عموما محصورة في المنطقة المحلية التي عاشت الأم فيها. وكلما رحل الناس من مكان لآخر، فإنهم يحملون معهم بطبيعة الحال دنا الميتوكندرات الخاص بهم. فمثلا، الناس الذين ارتحلوا واسعا عبر الزمن في مشارف الصحراء الإفريقية، نتيجة لذلك، تشترك الأقوام المختلفة التي تقطن بلدان القارة الإفريقية في نصف دنا الميتوكندرات تقريبا الخاص بالأفارقة جميعهم، كما برهنت على ذلك دراسة أجريت أخيرا. ■

كيف تتشكل القواقع البحرية، أو كيف تتشكل قوقعة الحلزون؟[**]

يجيب عن هذا السؤال <F. هورن> [البيولوجي في جامعة تكساس الولاياتية] بالآتي:

إن القواقع التي هي الهيكل الخارجي للرخويات - كالبطلينوس clam و**المحار** oyster والحلزون، وغيرها كثير - لا تتألف من خلايا تشكل البنى الحيوانية النمطية. إنها تتركب بصورة رئيسية من كربونات الكلسيوم مع كمية ضئيلة من البروتين تقل عادة عن 2 في المئة.

إن نسيج **الرداء** mantle، الذي يتوضع تحت القوقعة ويكون على تماس معها، يفرز البروتين والمعادن التي تشكل القوقعة. في البداية، تتشكل طبقة غير متكلسة من مادة **الكونشيولين** conchiolin: مادة تتألف من البروتين والكيتين chitin، والكيتين هو **بوليمر**[3] مقو يُنتج بصورة طبيعية، ثم تتشكل الطبقة الموشورية ذات التكلس الشديد، وتُفرز أخيرا الطبقة اللؤلؤية اللامعة، أو ما يعرف بالصدف (**عرق اللؤلؤ** nacre). وتشبه هذه السيرورة إرساء شبكة الفولاذ (البروتين) في عمارة الأبنية، ثم صب الإسمنت (المعادن) فوقها.

وفي حين أن عظام الحيوانات البرية، كالإنسان مثلا، تنمو مع نمو الكائن الحي، فإن على الحلزون والبطلينوس مثلا أن يزيدا تدريجيا من حجم قوقعتيهما بأن يضيفا مواد جديدة إلى حافات القوقعة. فمثلا، يتوضع القسم الأكثر حداثة من قوقعة الحلزون حول الجوف، حيث يُبرز الرخوي جسمه إلى الخارج؛ والحافة الخارجية للرداء تضيف باستمرار قوقعة جديدة في هذه المناسبة. ■

(*) How do researchers trace mitochondrial DNA over centuries?
(**) How are seashells or snail shells formed?

(1) جمع ميتوكندرة
(2) أو كروموزوماتنا.
(3) أو مكثور، متماثر، متبلمر.

أخبار علمية

ضربة قاضية في درجات الحرارة العالية[*]

«غراءان» محتملان في الموصلية الفائقة قُضي أمرهما.

خلال الثماني عشرة سنة منذ اكتشافها بقيت الموصلات الفائقة العالية الحرارة[1] أحجية. توصيل هذه المواد الخزفية، المؤلفة من أكسيد النحاس، الكهرباء من دون أن تفقد شيئا عند درجات حرارة أعلى كثيرا من تلك اللازمة للموصلات الفائقة التقليدية، مع أن هذه الحرارة لاتزال أدنى من درجة الحرارة العادية بكثير. ويعرف الفيزيائيون أن سبب الموصلية الفائقة في كلا النوعين من المواد هو إلكترونات متزاوجة ومتجمعة ككل في حالة كمومية جماعية واحدة. لكنهم لا يعرفون ما هو **«الغراء»** glue الذي يسبب تجمعها أزواجا في الموصلات الفائقة العالية الحرارة. وقد اقتُرحت أفكار عديدة لكنه لم يُبرهن على أي منها. وترى دراسة تجريبية حديثة أن بالإمكان إقصاء احتمالين نظريين مهمين.

ويتحقق التأثر الحاسم بين الإلكترونات بوساطة اهتزازات **شبيكة الأيونات الموجبة** latic of positive ions للمعدن في الموصلات الفائقة المنخفضة الحرارة: إذ يشوه إلكترونٌ ما الشبيكة لدى مروره فيها، وبعد انقضاء ميكروثوان عدة يؤثر التشوه في الإلكترون الشريك عند دخوله الشبيكة. وتدعى اهتزازات الشبيكة **فونونات** phonons وهي تسلك سلوك الجسيمات بالضبط، ويولّد إصدار الإلكترونات وامتصاصها لها تأثرا تجاذبيا ضعيفا. ويسمي الفيزيائيون هذا النموذج النظرية BCS[2] باسم العلماء الذين استنبطوها رياضياتيا في عام 1957.

وبعد اكتشاف الموصلات الفائقة العالية الحرارة في عام 1986، سارع الفيزيائيون إلى اعتبار أن النظرية البسيطة BCS لا يمكنها أن تفسر سلوك المواد الجديدة. وأول ما في الأمر هو أن الاهتزازات الحرارية الناجمة عن درجات الحرارة العالية يجب أن تقهر أي تجاذب تولده الفونونات (وقد وضع هذا الحد على درجة الحرارة الحرجة مؤخرا في موضع التساؤل). وثانيها أن استبدال **نظائر** isotopes مختلفة في موصل فائق من النوع BCS يغير مواصفات الفونونات (فالذرات الأثقل يجب أن تهتز بصورة أبطأ) وهو نتيجة لذلك يغير بدقة درجة الحرارة الحرجة بمقدار معين. ولكن هذه تتغير بمقادير مختلفة في الموصلات الفائقة العالية الحرارة. وهناك أيضا خواص تفصيلية أخرى يصعب تفسيرها في إطار النظرية BCS.

وكان الفيزيائيون يدرسون مؤخرا **فتلة** kink[3]، أو **انحناء** bend، تظهر في الخطوط البيانية التي تُعبِّر عن طاقة الإلكترونات المتزاوجة كمفتاح لحل لغز القوة المسببة لتجمعها أزواجا. وقد ربط العديد من الباحثين الفتلة بنوع من حالة جماعية بين الإلكترونات تدعى **الرنين (التجاوب) المغنطيسي** magnetic resonance. فيما قدم باحثون مجرِّبون حججا مفادها أن الفونونات هي سبب الفتلة ـ وهذه نتيجة يمكن أن تقلب الحكمة التقليدية حول الموصلات الفائقة غير التقليدية.

ويبدو أن نتائج التجارب التي أجريت في جامعة ماك ماستر وفي مختبر بروكهافن الوطني، اسقطت الرنين المغنطيسي والفونونات كليهما من كونهما الغراء. فقد عُرِّض الموصل الفائق في تجربة هذه المجموعة إلى ضوء تحت الأحمر (IR)، واعتبرت كمية الضوء المنتثر عند كل طول موجي قياسا لطاقة الزوج الإلكتروني. ووجد الفيزيائيون، بقيادة <T. تيموسك> [من جامعة ماك ماستر] ذروة حادة في الضوء المنتثر عند تردد محدد وقائمة فوق **خلفية**[4] انتثار عريضة عند جميع الترددات. من الواضح أن للذروة الحادة علاقة بالفتلة التي تلاحظ أيضا في تجارب أخرى، لكنها اختفت في المواد التي تدعى **زائدة التطعيم** overdoped والتي عدد ذرات الأكسجين فيها أكبر من العدد **الأمثل** optimal للموصلية الفائقة (تتصف المواد الزائدة التطعيم بالموصلية الفائقة إنما عند درجات حرارة تزداد انخفاضا كلما ازداد التطعيم) وهذا يستبعد كون الفونونات سبب الذروة والفتلة: فالفونونات يجب أن تبقى موجودة في جميع المواد، وحتى في الزائدة التطعيم منها. كما لا يمكن للفونونات أن تكون مسؤولة عن الخلفية العريضة: لو كان كذلك، لاختفت الخلفية عند الترددات العالية، وهذا ما لا يحدث.

كانت العلاقة التي تربط سلوك الذروة الحادة ـ أي الشروط التي تظهر فيها الذروة في المنحنى البياني ـ وما كان يُتوقع من رنين مغنطيسي جيدة. لكن هناك مفاجأة: اختفاء الذروة في المواد الزائدة التطعيم التي لاتزال فائقة الموصلية. ونتيجة لذلك لا يمكنها أن تكون سبب الموصلية الفائقة.

وتبقى مسألة الخلفية العريضة، التي يعتقد <تيموسك> ومعاونوه أنها على الأرجح مؤشر إلى السيرورة التي ترتبط بها الإلكترونات لتشكل أزواجا، كائنة ما كانت هذه العملية. ويحاجّ <M. نورمان> [عالم المواد في مختبر أركون الوطني] أنه على الرغم من أن الغراء لا يمكن أن يكون الرنين المغنطيسي الذي أشبع بحثا، فثمة أسباب قوية تدعو للاعتقاد أنه ذو طبيعة مغنطيسية. وهكذا يستمر البحث، فقد هُزم متنافسان بالضربة القاضية ولكن الأحجية باقية. ■

(*) HIGH-TEMP KNOCKOUT

(1) high critical temperature high TC؛ أي درجة حرارة حرجة عالية.

(2) BCS هي الأحرف الأولى من أسماء العلماء Bardeen و Cooper و Schrieffer.

(3) kink = tight curl, twist or bend، وتعني فتلة أو طية أو كوية.

(4) background

(التحرير)